



**Titre:** Etude géostatistique de la conductivité hydraulique en milieu stratifié, application aux résidus miniers

**Auteur:** Mathieu Gagné

**Date:** 1998

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Gagné, M. (1998). Etude géostatistique de la conductivité hydraulique en milieu stratifié, application aux résidus miniers [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/6768/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/6768/>

**Directeurs de recherche:**

**Programme:** Non spécifié

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE GÉOSTATISTIQUE DE LA CONDUCTIVITÉ  
HYDRAULIQUE EN MILIEU STRATIFIÉ, APPLICATION AUX  
RÉSIDUS MINIERS.

MATHIEU GAGNÉ  
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE MINÉRAL)  
AOÛT 1998



National Library  
of Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions et  
services bibliographiques

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file    Votre référence*

*Our file    Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-37441-6

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉTUDE GÉOSTATISTIQUE DE LA CONDUCTIVITÉ  
HYDRAULIQUE EN MILIEU STRATIFIÉ,  
APPLICATION AUX RÉSIDUS MINIERS

présenté par: GAGNÉ Mathieu

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. AUBERTIN Michel, Ph.D., président

M. MARCOTTE Denis, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. CHAPUIS Robert, D.Sc.A., membre et codirecteur de recherche

M. MILLETTE Denis, Ph.D., membre

## REMERCIEMENTS

L'accomplissement de cette recherche a été rendu possible grâce au programme de bourses à incidence industrielle du CRSNG en collaboration avec SNC Lavalin Environnement, ainsi qu'à l'aide financière conjointement accordée par Denis Marcotte et Robert Chapuis.

Je tiens aussi à remercier Nadia Bessim pour sa patience et son soutien moral au cours de cette longue période.

## RÉSUMÉ

Deux types d'essais de perméabilité ont été effectués au même endroit sur le site du parc à résidus miniers de Solbec et Cupra (Chapuis et al., 1992; L'Écuyer et al., 1992). Le premier type d'essai a été effectué à l'aide d'un perméamètre à injection horizontale tandis que le second type était l'essai en bout de tubage. Les deux tests ont donné des résultats dont les structures spatiales varient de manière importante. La variabilité du bout de tubage a une intensité plus importante que celle du perméamètre à injection horizontale. Les objectifs de la présente étude sont de déterminer de quelle manière le variogramme ponctuel est affecté par les deux types d'essais. L'estimation de l'anisotropie et l'impact du variogramme ponctuel sur le calcul de la conductivité hydraulique équivalente sont aussi abordés.

Les essais de perméabilité en place ont été simulés à l'aide d'un modèle par éléments finis. Les valeurs de conductivité hydrauliques ont été générées par des simulations stochastiques. L'anisotropie a été estimée par le rapport entre les moyennes harmoniques et arithmétiques des résultats simulés

Les structures spatiales des résultats simulés sont semblables à celles obtenues sur le site de Solbec et Cupra. La détermination de la structure spatiale ponctuelle est nécessaire pour établir la variabilité réelle de la conductivité hydraulique. Cette variabilité exerce une influence importante sur le calcul de l'anisotropie puisque l'anisotropie calculée à partir des résultats d'essais est sous estimée par rapport à l'anisotropie réelle. La structure spatiale ponctuelle exerce aussi une certaine influence sur le calcul de la conductivité équivalente.

## ABSTRACT

Two types of field permeability tests have been performed at the same location on the Solbec and Cupra mine tailings depot (Chapuis et al., 1992). The first type was an horizontal injection test and the second one was the end-of-casing test. These tests gave two different spatial structures. The variability of the end-of-casing is more important than the horizontal injection test. The aim of this study is to examine how much the point variogram is affected by the method of field permeability test. The estimation of the anisotropy and the impact of the type of test on two upscaling techniques results are also analyzed.

The field permeability tests have been simulated by a finite elements model. The permeability values of each cell was generated by unconditionnal stochastic simulations. The anisotropy was estimated by the ratio between the harmonic and the arithmetic means of the permeability tests results.

The spatial structures of the simulated permeability tests are similar to the field tests results. Determination of the point variogram is necessary to evaluate the real variability of the hydraulic conductivity. This variability have an important influence on the calculated anisotropy. The point variogram also have a measurable impact on the result of the upscaling operations.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	iv
RÉSUMÉ .....	v
ABSTRACT .....	vi
TABLE DES MATIÈRES .....	vii
LISTE DES TABLEAUX .....	x
LISTE DES FIGURES .....	xi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	xiii
LISTE DES ANNEXES .....	xv
 CHAPITRE I INTRODUCTION.....	 1
1.1 Problématique .....	1
1.2 Méthodologie.....	2
 CHAPITRE II REVUE DE LITTÉRATURE ET THÉORIE .....	 4
2.1 Hydrogéologie .....	4
2.1.1 Différences finies .....	6
2.1.2 Éléments finis .....	7
2.1.3 Détermination de la conductivité hydraulique.....	9
2.1.4 Modélisation d'essais de perméabilité.....	11
2.2 Changements d'échelle de la conductivité hydraulique .....	12
2.2.1 Revue de différentes méthodes de changement d'échelle.....	13
2.2.2 Comparaison des méthodes .....	19
2.3 Notions de géostatistique.....	20
2.3.1 Concept de variable régionalisée .....	20
2.3.2 Variogramme .....	21



2.3.3 Krigeage .....	24
2.3.4 Simulations stochastiques .....	25
2.4 Propriétés géotechniques des résidus miniers .....	32
2.4.1 Propriétés générales .....	32
2.4.2 Le site de Solbec et Cupra .....	34
 CHAPITRE III STRUCTURE SPATIALE INDUITE PAR LA GÉOMÉTRIE DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ EN PLACE .....	41
3.1 Modélisation d'essais de perméabilité en place.....	41
3.1.1 Simulation par éléments finis: SEEP Windows .....	41
3.1.2 Détermination de la conductivité hydraulique d'un essai .....	42
3.1.3 Modèle du dépôt.....	42
3.1.4 Simulation stochastique des valeurs de conductivité hydraulique.....	48
3.1.5 Production de fichiers de paramètres et simulation des essais .....	52
3.2 Changement d'échelle.....	53
3.2.1 Simulation du champ de valeurs ponctuelles .....	54
3.2.2 Conductivité hydraulique équivalente.....	55
 CHAPITRE IV RÉSULTATS.....	58
4.1 Structure spatiale .....	58
4.2 Comparaison du résultat des deux modèles .....	64
4.3 Comparaison des valeurs ponctuelles et des résultats d'essais numériques .....	66
4.4 Anisotropie .....	74
4.5 Conductivité équivalente.....	78
4.5.1 Conductivité équivalente par différences finies.....	78

4.5.2 Conductivité hydraulique équivalente par renormalisation.....	79
4.5.3 Comparaison des deux méthodes de mise à l'échelle.....	80
CHAPITRE V DISCUSSION.....	83
5.1 Reproduction des essais en place .....	83
5.2 Effet de l'échelle des essais .....	85
5.3 Modification de la structure spatiale.....	86
5.4 Représentativité des essais .....	87
5.5 Estimation de l'anisotropie .....	89
5.6 Facteur géométrique .....	90
5.7 Changement d'échelle.....	91
CONCLUSION .....	93
RÉFÉRENCES .....	95
ANNEXES .....	102

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1	Validation des résultats de Modflow .....	56
Tableau 4-1	Modèles de variogramme des résultats .....	64
Tableau 4-2	Anisotropies réelles et estimées .....	74
Tableau A-1	Résultats des essais effectués sur le site de Solbec et Cupra (Morin, 1992) .....	108

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Exemple de changement d'échelle par la méthode de renormalisation simplifiée .....	18
Figure 2.2	Localisation du site de Solbec et Cupra .....	35
Figure 2.3	Schéma du PERMAC utilisé par Chapuis <i>et al.</i> (1992).....	36
Figure 2.4	Détail de la zone d'injection du PERMAC.....	37
Figure 2.5	Variogrammes du logarithme des valeurs de conductivités hydrauliques mesurées au site de Solbec et Cupra (Morin 1992) .....	40
Figure 3.1	Modèle numérique du dépôt, zone d'injection de type Lefranc (PERMAC) .....	45
Figure 3.2	Modèle SEEP/W de l'essai au PERMAC, détail de la zone d'injection.....	47
Figure 3.3	Modèle SEEP/W de l'essai en bout de tubage, détail de la zone d'injection.....	48
Figure 3.4	Variogrammes des simulations de valeurs ponctuelles de conductivité hydraulique ( $\log_{10} K$ ) pour le modèle avec effet pépité.....	51
Figure 4.1	Variogrammes du logarithme en base 10 de K résultant de la modélisation d'essais sans effet pépité .....	59
Figure 4.2	Variogrammes de la conductivité hydraulique équivalente obtenue par modélisation numérique d'essais de perméabilité pour les simulation avec effet pépité ( $\log_{10} K_e$ ) .....	61
Figure 4.3	Comparaison des variogrammes des résultats d'essais numériques pour les simulations avec effet pépité 2.3 et 2.4 et des modèles de variogrammes des essais in situ ( $\log_{10} K$ ) .....	62

Figure 4.4	Comparaison des variogrammes du $\log_{10}(K)$ de l'ensemble des simulations numériques et des modèles de variogrammes des essais en place effectués sur le site de Solbec et Cupra (Morin 1992) .....	63
Figure 4.5	Diagramme de dispersion des moyennes géométriques ( $\log K_g$ ) sur 150 résultats d'essais de perméabilité numérique pour les 4 simulations de valeurs sans effet pépité .....	65
Figure 4.6	Diagramme de dispersion des moyennes géométriques ( $\log K_g$ ) sur 32 essais de perméabilité numériques pour les 12 simulations de valeurs ponctuelles avec effet pépité .....	66
Figure 4.7	Régression linéaire du résultat des essais en bout de tubage ( $K_e$ ) en fonction de la conductivité hydraulique ponctuelle des strates en contact avec la zone d'injection ( $K_{sim}$ ) .....	68
Figure 4.8	Régression linéaire des résultats des essais numériques en bout de tubage ( $K_e$ ) en fonction de la conductivité hydraulique des strates en contact avec la zone d'injection ( $K_{sim}$ ) pour l'ensemble des résultats.....	69
Figure 4.9	Régression linéaire du résultat des essais au PERMAC ( $K_e$ ) en fonction de la moyenne arithmétique de la conductivité hydraulique des strates en contact avec la zone d'injection ( $K_{sim}$ ) .....	70
Figure 4.10	Régression linéaire entre la moyenne arithmétique des valeurs des strates en contact avec la zone d'injection ( $K_{sim}$ ) et le résultat des essais ( $K_e$ ) pour l'ensemble des résultats des simulations d'essais au PERMAC.....	72
Figure 4.11	Moyennes comparées des valeurs ponctuelles simulées et de la réponse des essais numériques au PERMAC et en bout de tubage.....	73

Figure 4.12	Comparaison des anisotropies estimées par deux méthodes et des anisotropies calculées sur l'ensemble des valeurs ponctuelles de strates simulées .....	77
Figure 4.13	Diagramme de dispersion des résultats de la conductivité hydraulique équivalente obtenue par différences finies à partir des valeurs simulées à l'aide du modèle de variogramme du PERMAC et celui du bout de tubage .....	79
Figure 4.14	Diagramme de dispersion pour les conductivités hydrauliques équivalentes déterminées par renormalisation simplifiée ( $K_r$ ) des valeurs simulées à l'aide des modèles de variogrammes du PERMAC et du bout de tubage. ....	80
Figure 4.15	Comparaison des résultats de conductivité hydraulique équivalente obtenus par renormalisation ( $K_r$ ) et par différences finies ( $K_e$ ) .....	81
Figure 4.16	Diagramme de dispersion de la conductivité hydraulique équivalente calculée par renormalisation ( $K_r$ ) et de la moyenne géométrique des valeurs ponctuelles ( $K_g$ ) .....	82

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

$\lambda$	: Poids dans l'estimateur du krigeage
$\mu$	: Moyenne
$\sigma^2$	: Variance
$a$	: Portée du variogramme
$b$	: Épaisseur de strate
BT	: Bout de tubage
$c$	: Facteur géométrique
<b>C</b>	: Matrice des covariances
$C$	: Palier du variogramme
$C_0$	: Effet pépite
$H$	: Charge hydraulique
$i$	: Gradient hydraulique
$K$	: Conductivité hydraulique
$K_e$	: Conductivité hydraulique équivalente
$K_g$	: Moyenne géométrique de la conductivité hydraulique
$K_h$	: Conductivité hydraulique horizontale
$K_{\max}$	: Conductivité hydraulique maximale
$K_{\min}$	: Conductivité hydraulique minimale
$K_r$	: Conductivité hydraulique obtenue par renormalisation
$K_{\text{sim}}$	: Valeurs de $K$ simulées (valeurs ponctuelles)
$K_v$	: Conductivité hydraulique verticale
<b>L</b>	: Matrice triangulaire inférieure de la décomposition de Cholevski
PM	: PERMAC
$Q$	: Débit
$r$	: Distance
<b>y</b>	: Vecteur de valeurs aléatoires

## LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I: MACROS EXCEL D'AUTOMATISATION DE LA GESTION DES FICHIERS .....	102
ANNEXE II: ALGORITHME DE SIMULATION LU.....	105
ANNEXE III: ALGORITHME DE RENORMALISATION SIMPLIFIÉE .....	107
ANNEXE IV: RÉSULTATS DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ EFFECTUÉS PAR MORIN(1992) .....	108
ANNEXE V: EXEMPLE DE FICHIER DE PARAMÈTRES SEEP .....	109
ANNEXE VI: EXEMPLE DE FICHIER DE PARAMÈTRES POUR SGSIM .....	110



# CHAPITRE I

## INTRODUCTION

La modélisation numérique de l'écoulement des eaux dans les sols fait partie des moeurs lors des études environnementales. Les outils pour y parvenir sont de plus en plus puissants et sophistiqués. Il est maintenant permis de construire des modèles complexes de manière à produire des images de la réalité toujours plus fidèles. Mais la pertinence d'un modèle reste toujours soumise à la qualité des paramètres qui y sont assignés. Dans le cas particulier de la conductivité hydraulique, il est largement admis qu'une simple extrapolation de valeurs mesurées sur le terrain ou en laboratoire à l'élément d'un modèle numérique ne peut être satisfaisante sans tenir compte de l'effet de changement d'échelle. Différentes techniques sont utilisées pour effectuer ce changement d'échelle. La recherche de méthodes plus rapides fait l'objet de beaucoup de préoccupations. Le débat porte habituellement sur la manière par laquelle on peut passer de l'échelle quasi ponctuelle à un volume de la taille des éléments d'un modèle numérique régional. Une question demeure toutefois en suspens: peut-on considérer les valeurs de conductivité hydraulique mesurées sur le terrain comme ponctuelles? Si tel n'est pas le cas, comment utiliser ces valeurs comme base à un calcul de changement d'échelle? Le présent mémoire tentera d'apporter quelques éléments de réponses à ces questions.

### 1.1 Problématique

Les techniques d'essais de perméabilité ont la plupart du temps des résultats dont la structure spatiale est dépendante de la géométrie et du rayon d'influence de l'essai. Les résultats d'une série d'essais de perméabilité

effectués au parc à résidus miniers de Solbec et Cupra (Chapuis et al. 1992) montrent une différence marquée entre les structures spatiales des résultats provenant de deux types d'essais effectués au même endroit. Ces différences sont vraisemblablement dues au fait que les appareils ont une géométrie et un rayon d'influence différents. Le premier type d'essai a été effectué à l'aide d'un perméamètre à injection horizontale tandis que le second a été effectué grâce à une technique à injection verticale.

Cette étude vise quatre objectifs:

1. Expliquer les différences dans les résultats des essais effectués.
2. Déterminer de quelle manière la structure spatiale ponctuelle de la conductivité hydraulique est transformée par les essais.
3. Vérifier s'il est possible de déterminer l'anisotropie de conductivité hydraulique du dépôt à l'aide des résultats.
4. Mesurer l'impact du choix d'un des deux variogrammes quasi ponctuels sur le résultat d'un calcul de conductivité hydraulique équivalente.

## **1.2 Méthodologie**

L'approche proposée consiste à construire le modèle numérique d'un dépôt stratifié de résidus miniers. Les valeurs de conductivité hydrauliques attribuées à chaque élément du modèle seront déterminées par des simulations stochastiques effectuées à partir d'un variogramme ponctuel donné. Deux types d'essais de perméabilité en place seront modélisés, soit l'essai au PERMAC et l'essai en bout de tubage. Ces essais seront effectuées dans le but de connaître la réponse d'un essai de perméabilité effectué dans un ensemble de strates dont la conductivité hydraulique est connue. Les structures spatiales des résultats seront comparées à celles des essais du site Solbec et Cupra.

L'anisotropie déterminée à partir des résultats des simulations d'essais de perméabilité des deux types d'appareils sera comparée à celle obtenue de manière analytique sur l'ensemble du dépôt.

L'influence du variogramme ponctuel sur la conductivité hydraulique équivalente d'un bloc sera analysée en générant des valeurs de conductivité hydraulique à partir des variogrammes obtenus par les deux types d'essais. La conductivité hydraulique équivalente pour chaque ensemble de données sera déterminée à l'aide d'un modèle en différences finies et par une technique de renormalisation simplifiée.

## **CHAPITRE II**

### **REVUE DE LITTÉRATURE ET THÉORIE**

#### **2.1 Hydrogéologie**

Les modèles d'écoulement sont des outils qui aident à comprendre les phénomènes complexes qui régissent le déplacement de l'eau souterraine. Ils servent aussi à fournir des informations devant aider à prévoir et à gérer ces phénomènes. Les études sur le transport par modélisation impliquent toujours la mise au point préalable d'un modèle d'écoulement adéquat. Les modèles sont généralement basés sur des principes physiques tels que la loi de Darcy et la conservation de masse (De Marsily, 1981). Ces principes physiques se traduisent en général par des équations différentielles. Dans le cas de problèmes linéaires à géométrie simple, les équations peuvent être résolues de manière analytique (Todd, 1980). Les problèmes tels que l'écoulement unidimensionnel radiaux en milieu homogène possèdent des solutions analytiques connues. Ces solutions analytiques sont largement utilisées pour le calcul de la conductivité hydraulique dans le cadre d'essais en laboratoire et sur le terrain.

Un des concepts de base en hydrogéologie est la loi de Darcy qui met en relation le flux, le gradient hydraulique et une constante inversement proportionnelle à la résistance à l'écoulement d'un liquide dans un milieu poreux; la conductivité hydraulique ( $K$ ). Sa forme la plus simple apparaît comme (Todd, 1980):

$$v = -K \frac{dh}{dl} \quad (2.1)$$

où  $v$  représente le flux unitaire ou la vitesse (L/T),  $K$  est la conductivité hydraulique (L/T) et  $\frac{dh}{dl}$  le gradient hydraulique (sans unités). Le débit traversant un milieu poreux soumis à un certain gradient hydraulique est donné par:

$$Q = -K \frac{dh}{dl} A \quad (2.2)$$

où  $Q$  représente le débit (L<sup>3</sup>/T) et  $A$  un facteur géométrique (L<sup>2</sup>).

Dans un milieu saturé anisotrope en trois dimensions, l'équation de Darcy prend la forme générale (Freeze and Cherry, 1979):

$$v_i = -K_{ij} \frac{\partial(h)}{\partial(x_j)} \quad \text{avec } i,j = (x, y, z) \quad (2.3)$$

où  $x_j = (x, y, z)$  sont les coordonnées d'un point,  $v_i$  représente le flux dans la direction  $i$ ,  $h$  est la charge ou potentiel hydraulique et  $K_{ij}$  le tenseur de conductivité hydraulique:

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Un second concept essentiel en hydrogéologie est le principe de continuité. L'équation générale de continuité est basée sur la conservation de masse d'un

fluide dans un milieu poreux. Elle s'exprime, sous sa forme générale en milieu anisotrope (Bear, 1979):

$$\frac{\partial}{\partial(x_i)} \left( K_{ij} \frac{\partial(h)}{\partial(x_j)} \right) - S \frac{\partial(h)}{\partial(t)} = 0 \quad (2.5)$$

où  $t$  est le temps et  $S = \rho g(\alpha + \eta\beta)$  est le coefficient d'emmagasinement avec  $\alpha$  la compressibilité du milieu poreux,  $\beta$  la compressibilité du fluide,  $\eta$  la porosité effective et  $\rho$  la masse volumique de l'eau. La résolution de cette équation requiert que les conditions aux frontières du domaine soient spécifiées (Frind 1993). Les deux types de conditions frontières habituellement utilisées sont les contraintes de charges et les contraintes de débit.

Pour résoudre des problèmes dans lesquels des processus non linéaires sont en jeu ou qui ont une géométrie complexe, il est souvent plus simple et plus rapide d'utiliser des méthodes numériques (de Marsily 1981). Les deux méthodes numériques les plus employées en hydrogéologie sont les différences finies et les éléments finis.

### 2.1.1 Différences finies

Avec la méthode des différences finies le domaine à étudier est divisé en une série d'éléments. La méthode fait l'approximation des dérivées de l'équation généralisée de Darcy par la différence des charges entre le point milieu de chaque élément de la grille. On obtient ainsi une équation pour chaque élément et il est possible d'obtenir une solution au système d'équation de l'ensemble du domaine étudié. La conductivité hydraulique moyenne d'un élément à l'autre est

calculée par les moyennes harmoniques entre les conductivités hydrauliques attribuées à ceux-ci.

La méthode offre l'avantage d'être simple et facile à programmer. Elle s'est montrée appropriée pour l'étude d'aquifères régionaux (de Marsily 1981). En théorie, les éléments peuvent prendre des formes variées mais en pratique, seuls les éléments rectangulaires sont employés ce qui limite la possibilité de créer des modèles à géométrie complexe. Les hétérogénéités doivent être représentées par la forme de la grille et les anisotropies doivent être parallèles aux éléments.

### **2.1.2 Éléments finis**

Le principe des éléments finis appliqués à la mécanique des solides a été développé dans les années 1940. Son application à la modélisation d'aquifère a été amenée il y a environ 30 ans (Pinder et al., 1972; Remson et al., 1971). Comme pour la méthode des différences finies, le domaine étudié est divisé en éléments dont les sommets sont les noeuds. À chacun de ces noeuds est attribuée une équation définissant la charge. Ces équations différentielles sont décomposées en une sommation d'équations qui sont exprimées en termes de valeurs nodales.

La méthode des différences finies ne précise pas de quelle façon les charges varient d'un élément à l'autre. Par opposition, la méthode des éléments finis définit la manière avec laquelle les charges varient d'un noeud à l'autre par des fonctions d'interpolation. Quand les éléments sont triangulaires, ces fonctions sont généralement linéaires. Ainsi les charges sont continues sur tout le domaine étudié. L'unité d'intégration pour le calcul des charges est constitué

des portions d'éléments ayant un noeud commun. Les paramètres tels que la conductivité hydraulique peuvent donc varier à l'intérieur de cette unité. L'anisotropie est prise en charge par une rotation d'axe qui peut être effectuée indépendamment pour chacun des éléments. La continuité des débits est respectée pour le polygone formé par l'unité d'intégration entourant chaque noeud. Par conséquent cette continuité peut ne pas être respectée sur le périmètre des éléments. Les fonctions d'interpolations définissant les charges sont insérées dans l'équation générale de continuité ( 2.5 ) dont la résiduelle est minimisée pour tendre vers zéro.

Si la méthode des éléments finis ressemble à celle des différences finies, elle est toutefois plus flexible que cette dernière. Elle autorise l'utilisation d'éléments de forme variée. Cette caractéristique offre l'avantage de permettre la représentation de domaines à géométrie irrégulière. Les éléments finis reproduisent plus fidèlement les hétérogénéités. Les anisotropies peuvent prendre n'importe quelle direction et elles peuvent varier d'un élément à l'autre. La précision du résultat est la même qu'avec les différences finies dans le cas de flux unidimensionnels à paramètres constants. Lorsque les paramètres sont variables dans le temps et dans l'espace, les éléments finis donnent une meilleure précision. Ces caractéristiques en font un outil approprié aux problèmes locaux de génie civil ou pour l'étude de l'effet de puits de pompage (de Marsily 1981).

Le principal handicap des éléments finis vient de leur complexité. Leur programmation est difficile. Le nombre de paramètres à prendre en charge est grand, ce qui augmente le risque d'erreur. Par ailleurs, le temps de calcul est supérieur à celui des différences finies.



### 2.1.3 Détermination de la conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique peut être calculée de plusieurs manières. Certaines techniques de prévision à priori mettent en relation la conductivité hydraulique et certaines caractéristiques des matériaux comme la porosité, la surface spécifique et la granulométrie. Certaines de ces relations sont très connues et fréquemment employées. C'est le cas notamment de la formule de Hazen, la relation de Kozeny-Carman et celle de Bates-Wayment (Aubertin et al., 1996; Chapuis et Montour, 1992; Todd, 1980; Freeze and Cherry, 1979; Bear, 1972). Ces méthodes d'évaluation offrent l'avantage de fournir rapidement des valeurs guides à partir d'analyses granulométriques qui sont assez peu coûteuses. Malheureusement, l'estimation obtenue est parfois grossière. Les formules plus élaborées comme celle de Kozeny-Carman offrent une plus grande précision, mais impliquent que la formule soit calibrée à partir d'essais en laboratoire (Chapuis et Montour, 1992). Une version modifiée de cette formule introduit un facteur dit de "tortuosité" qui tient compte de l'indice des vides  $e$  (Aubertin et al., 1996):

$$k = c \frac{\gamma_w}{\mu} D_{10}^2 C_u^{1/3} \frac{e^{3+x}}{(1+e)} \quad (2.6)$$

où  $k$  est la conductivité hydraulique,  $\gamma_w$  le poids volumique de l'eau,  $\mu$ , la viscosité du fluide,  $D_{10}$  un facteur granulométrique défini comme le diamètre des orifices du tamis ne laissant passer que 10% des particules du sol,  $C_u$  le coefficient d'uniformité défini comme le rapport  $D_{60}/D_{10}$  et  $e$  l'indice des vides défini comme le rapport du volume de vide sur le volume de solide d'un sol.

Les essais visant à déterminer la conductivité hydraulique du milieu sont aussi appelés "essais de perméabilité". D'une manière générale, la relation entre le débit, le gradient et la conductivité hydraulique  $K$  est définie par:

$$Q = Kci \quad (2.7)$$

où  $Q$  est le débit,  $K$  la conductivité hydraulique,  $i$  le gradient hydraulique et  $c$  un facteur géométrique. Cette expression est équivalente à l'équation (2.2).

Les essais peuvent être fait en laboratoire où des échantillons remaniés ou non sont soumis à un gradient hydraulique. La mesure du débit à l'entrée et à la sortie du système permet de calculer la valeur de la conductivité hydraulique de l'échantillon. Des essais en cellule triaxiale permettent de déterminer le tenseur de conductivité hydraulique. Le principal problème rencontré en laboratoire a trait à la représentativité des échantillons. L'échantillon de laboratoire représente un volume de quelques centimètres cubes seulement. Le prélèvement d'échantillons non remaniés constitue aussi un défi en soi. Le facteur géométrique  $i$  (équation 2.7) d'un perméamètre à paroi rigide correspond généralement à la section du perméamètre.

Les essais in situ consistent à injecter une certaine quantité d'eau dans le sol à l'aide d'un tubage crépiné (Bouwer et Rice, 1976; Bouwer, 1989). Dans le cas des essais à charge variable la vitesse de descente du niveau d'eau dans le tubage est mesurée de manière à en déduire la perméabilité. Pour les essais à charge constante, c'est la quantité d'eau injectée qui est mesurée. Le facteur géométrique à utiliser varie en fonction de la géométrie du problème. Le facteur géométrique est aisément déduit dans le cas de problèmes simples d'écoulement laminaire unidirectionnel. Les facteurs géométriques utilisés dans les problèmes d'écoulement radiaux sont plus complexes et nécessitent

l'imposition d'hypothèses assez fortes quant à l'homogénéité et aux dimensions de l'aquifère. Néanmoins, ces facteurs géométriques ont été déterminés pour un grand nombre de configurations d'essais de perméabilité et de pompage (Todd, 1980; Hvorslev, 1951).

#### **2.1.4 Modélisation d'essais de perméabilité**

La modélisation numérique d'essais de perméabilité permet d'étudier de manière théorique la réponse qu'aurait un essai de perméabilité dans un milieu donné. La technique a été utilisée par plusieurs auteurs pour déterminer les facteurs géométriques à utiliser dans le calcul de la conductivité hydraulique à partir d'essais en place. Les différences observées entre les facteurs géométriques théoriques énumérés par Hvorslev (1951) et les facteurs géométriques déterminés numériquement sont de l'ordre de 40 à 100% (Chapuis, 1989). L'utilisation de facteurs géométriques analytiques dans les modèles numériques s'avère peu appropriée car les modèles numériques ont des dimensions finies ce qui est incompatible avec les hypothèses des solutions analytiques. L'application de conditions frontières aux modèles numériques induit des "puits miroirs" qui faussent les résultats. Ces puits miroirs sont des puits imaginaires provoqués par la présence de frontières imperméables ou de frontières de recharge (Todd, 1980). En tenant compte de ces effets de frontière, il est possible de déterminer de manière théorique le facteur géométrique à utiliser dans un modèle numérique (Chapuis, 1989). Certains logiciels de simulation permettent en outre d'inclure des éléments infinis à un modèle.

Des essais en place de type Lefranc et en bout de tubage ont été modélisés par plusieurs auteurs dont El Haddad (1993). Ces simulations ont été effectuées

par éléments finis dans le but de comparer les facteurs géométriques proposés par Hvorslev (1951) et ceux obtenus de manière numérique. Les résultats obtenus montrent des différences entre les valeurs théoriques et numériques de l'ordre de 7% à 15%.

## **2.2 Changements d'échelle de la conductivité hydraulique**

Dans le cadre d'une modélisation d'écoulement régional, on ne dispose habituellement que de valeurs de conductivité hydraulique ponctuelles ou quasi ponctuelles. Généralement, les modèles d'écoulement ont un nombre d'éléments limité par la consommation en temps de calcul des simulations ce qui implique que des valeurs quasi ponctuelles doivent être attribuées à des éléments dont la taille est beaucoup plus importante que le volume investigué lors des essais. Les études sur les changements d'échelle visent à déterminer une conductivité hydraulique équivalente qui doit être appliquée aux éléments d'un modèle d'écoulement. Cette conductivité hydraulique équivalente représente la valeur unique qui produirait les mêmes caractéristiques d'écoulement global que le champ de conductivités hydrauliques ponctuelles (Roth et al., 1995).

Plusieurs auteurs insistent sur l'importance de tenir compte de l'effet de changement d'échelle lors des études impliquant des paramètres de flux et de transport en hydrogéologie et proposent différentes techniques pour y parvenir (Cushman, 1986; Rovey et Cherkauer, 1995; Neuman, 1990; Desbarats, 1992; Rubin et Gómez-Hernández, 1990). La pratique courante consiste à simuler un grand nombre de valeurs à l'échelle des essais. L'échelle peut être de l'ordre du centimètre pour des essais en laboratoire ou de l'ordre du décimètre pour des essais à charge variable in situ (Guyonnet et al., 1993). Une opération est

ensuite effectuée sur ces valeurs pour connaître la conductivité hydraulique effective ou équivalente d'un élément du modèle.

## **2.2.1 Revue de différentes méthodes de changement d'échelle**

Certaines des méthodes de changement d'échelle sont décrites brièvement. La compilation présentée ici provient d'un rapport technique publié par l'École des Mines de Paris (Renard *et al.* 1996).

### **2.2.1.1 Solution analytique**

Dans les cas simples d'écoulement uniforme en milieu stratifié ou homogène, la solution analytique de la conductivité hydraulique équivalente peut être calculée. La solution analytique de la conductivité hydraulique équivalente d'un ensemble d'éléments parfaitement stratifiés est connue. Lorsque la direction de l'écoulement est parallèle aux strates, la conductivité hydraulique est donnée par une moyenne arithmétique pondérée des valeurs de conductivité hydraulique des éléments (Todd, 1980):

$$K_e = \frac{K_1 b_1 + K_2 b_2 + \dots + K_n b_n}{b_1 + b_2 + \dots + b_n} \quad (2.8)$$

où  $K_i$  sont les valeurs de conductivité hydraulique de chaque strate,  $b_i$ , les épaisseurs relatives des strates et  $n$  le nombre de strates. La conductivité hydraulique équivalente pour une direction d'écoulement perpendiculaire aux strates est donnée par une moyenne harmonique pondérée des valeurs de conductivité hydraulique (Todd, 1980):

$$K_e = \frac{b_1 + b_2 + \dots + b_n}{\frac{b_1}{K_1} + \frac{b_2}{K_2} + \dots + \frac{b_n}{K_n}} \quad (2.9)$$

Les équations 2.8 et 2.9 correspondent à la moyenne arithmétique simple et à la moyenne harmonique simple lorsque  $b_1 = b_2 = \dots = b_n$ .

### **2.2.1.2 Moyenne géométrique**

La conductivité hydraulique peut être considérée comme une variable distribuée dans l'espace. Lorsque la conductivité hydraulique relative  $k/E(k)$  et son inverse  $k^{-1}/E(k^{-1})$  ont la même fonction de probabilité et que cette fonction n'est pas affectée par une rotation de  $90^\circ$ , la moyenne géométrique définie par:

$$K_{ef} = \mu_g = \exp[E(\log k)] \quad (2.10)$$

où  $E$  représente l'espérance, est une solution exacte de la conductivité hydraulique équivalente (Matheron 1967). Ces conditions ne sont satisfaites que lorsque la distribution de  $K$  est lognormale et que le flux est uniforme.

### **2.2.1.3 Moyenne de puissances**

La moyenne de puissance est définie par:

$$\mu_p = \left( \frac{1}{V} \int_V (k(x)^p) dV \right)^{\frac{1}{p}} \quad (2.11)$$

où  $p$  est un exposant compris entre -1 et 1 (Journel, Deutsch et Desbarats, 1986). Il est à noter que lorsque  $p=1$  et  $p=-1$ , l'équation (2.11) correspond

respectivement à la moyenne arithmétique et à la moyenne harmonique. Avec une variable dont la distribution est lognormale, comme c'est souvent le cas pour la conductivité hydraulique, ( 2.11 ) devient (Ababou et Wood, 1990):

$$\mu_p = \mu_g \left( \frac{p\sigma_{\ln k}^2}{2} \right) \quad (2.12)$$

où  $\mu_g$  est la moyenne géométrique et  $\sigma_{\ln k}^2$  la variance du logarithme de  $k$ .

L'exposant  $p = \frac{1}{3}$  semble offrir le meilleur ajustement pour une conductivité hydraulique équivalente dans le cas d'un champ cubique et d'une structure spatiale isotrope (Desbarats, 1992). Cette valeur a aussi été calculée théoriquement pour une variable lognormale isotrope dans un champ 3D infini (Matheron, 1967).

#### **2.2.1.4 Théorie de la percolation**

Cette théorie traite statistiquement des interconnexions dans un milieu bi-modal entre des éléments perméables et imperméables ( $K=0$  et  $K=\text{constante}$ ). Soit  $n$  la proportion d'éléments perméables et  $n_c$  le seuil de percolation, à proximité de  $n_c$  (Berkowitz and Balberg, 1993),

$$\begin{aligned} n < n_c &\rightarrow K_{\text{ef}} = 0 \\ n > n_c &\rightarrow K_{\text{ef}} = A \times (n - n_c)^\mu \end{aligned} \quad (2.13)$$

où  $A$  et  $n_c$  dépendent de la géométrie du problème et  $\mu$  de sa dimension.

### 2.2.1.5 Milieu effectif

Soit une matrice d'éléments hétérogènes remplacée par un élément de conductivité hydraulique connue  $K$  inséré dans une matrice d'éléments de conductivité hydraulique inconnue  $K_0$ . Si l'inclusion de conductivité hydraulique  $K$  a une forme simple et que le flux autour de celle-ci est considéré comme constant, il existe une solution analytique pour les charges à l'intérieur et à l'extérieur de cette inclusion. En posant l'hypothèse que les perturbations engendrées par cette inclusion n'interféreraient pas sur la perturbation d'autres inclusions et que  $K_{ef}=K_0$ , la solution pour une inclusion de forme sphérique sera (Dagan, 1979; Dagan, 1989):

$$K_{ef} = \frac{1}{D} \left[ \int_0^\infty \frac{f(K)dK}{K(D-1) + K_{ef}} \right]^{-1} \quad (2.14)$$

où  $f(K)$  est la fonction de densité de probabilité de  $K$  et  $D$  la dimension spatiale du problème. La solution de ( 2.14 ) est obtenue en faisant varier  $K_{ef}$  jusqu'à égalité des deux membres de l'équation.

### 2.2.1.6 Renormalisation

La renormalisation est un algorithme de réduction par agrégation d'éléments. Pour un problème de dimension  $D$ , le procédé transforme une grille de taille  $2^{nD}$  en une grille de taille  $2^{(n-1)D}$  à chaque itération. L'opération est répétée jusqu'à ce que la grille ait la taille voulue.

À chaque combinaison de cellule, une conductivité hydraulique équivalente est calculée. Les méthodes de calcul sont variées. Les plus anciennes méthodes appelées renormalisation standard proposent un système d'équations linéaires



de type différences finies analogue à un circuit électrique. Plus récemment la renormalisation tensorielle utilise des conditions frontières périodiques de manière à calculer directement un tenseur de conductivité hydraulique.

### *Renormalisation simple*

La renormalisation simple combine les cellules deux à deux (Le Loc'h, 1987). Lorsque les deux cellules sont en série par rapport à la direction du flux, la conductivité hydraulique équivalente est calculée par une moyenne harmonique. Lorsqu'elles sont en parallèle, c'est la moyenne arithmétique qui est utilisée. À chaque itération, la direction d'agrégation est alternée. Le résultat final variera en fonction de la direction de la première itération. La valeur de conductivité hydraulique équivalente minimale  $K_{\min}$  sera obtenue lorsque les premiers éléments combinés sont en série par rapport à la direction du flux (moyenne harmonique). À l'inverse,  $K_{\max}$  sera obtenu lorsque les premiers éléments combinés sont en parallèle par rapport au flux (moyenne arithmétique). La valeur de conductivité équivalente finale est obtenue par une moyenne géométrique des deux résultats:

$$K_{ef} = \sqrt{K_{\min} K_{\max}} \quad (2.15)$$

Une variation de cette méthode appelée renormalisation simplifiée (Renard, 1997) combine la méthode de renormalisation simple et une formule prenant en charge l'anisotropie par le biais d'un exposant:

$$K^{ii} = (K_{\max}^{ii})^{\alpha} (K_{\min}^{ii})^{1-\alpha} \quad (2.16)$$

$$\text{avec } \alpha(a_j^i, a_k^i) = \frac{u(a_j^i) + u(a_k^i) - 2u(a_j^i)u(a_k^i)}{1 - u(a_j^i)u(a_k^i)} \quad i \neq j \neq k \in \{x, y, z\}$$

$$\text{et} \quad a_i^j = \frac{K^{ij}}{K^{jj}} \left( \frac{d_j}{d_i} \right)^2, \quad u(t) = \frac{\arctan \sqrt{t}}{\pi/2}$$

Lorsque l'anisotropie  $a_i^i = a_k^k = 1$ , ( 2.16 ) devient équivalent à la renormalisation simple ( 2.15 ).

La Figure 2.1 montre le résultat de la renormalisation d'une grille de 128 x 128 en une grille de 16 x 16. Les valeurs de la Figure 2.1a représentées par des tons de gris ont été générées par une simulation séquentielle gaussienne (section 2.3.4.1). La structure spatiale est définie par un variogramme sphérique dont la portée a un axe principal de 80 unités dans la direction nord 345° et un axe secondaire de 50 unités. L'effet pépité ( $C_0$ ) a une valeur de 0.05 et le plateau ( $C+C_0$ ) s'élève à 1.

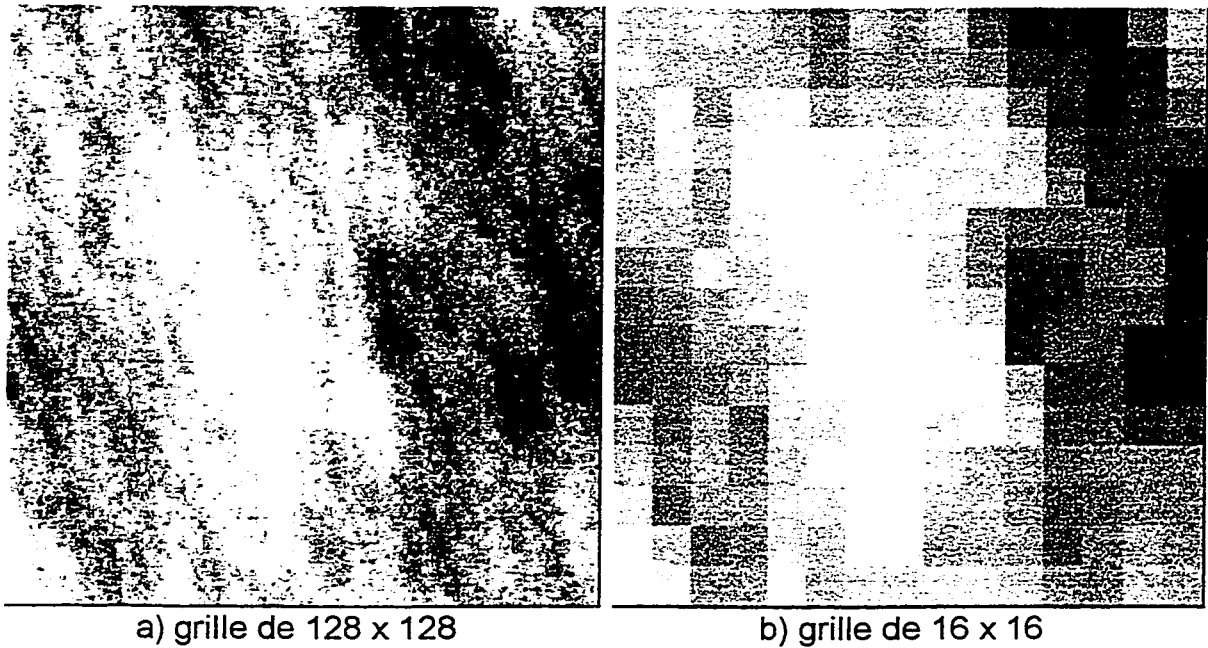


Figure 2.1 Exemple de changement d'échelle par la méthode de renormalisation simplifiée

### 2.2.1.7 Solution numérique

La perméabilité équivalente d'un ensemble d'éléments peut être obtenue de manière numérique par éléments finis ou différences finies. La solution numérique donne comme résultat un débit total passant au travers l'ensemble des éléments soumis à certaines conditions frontières. La conductivité hydraulique équivalente d'un cas simple de flux unidirectionnel de type perméamètre est donnée par:

$$K_{eq} = - \frac{Q}{A} \frac{L}{\Delta H} \quad (2.17)$$

où Q est le débit traversant la section A,  $\Delta H$  la perte de charge et L la longueur du champ. On obtient la conductivité hydraulique dans les trois directions en effectuant une rotation des conditions frontières. Il est aussi possible de calculer un tenseur de conductivité hydraulique complet en utilisant des conditions frontières périodiques.

### 2.2.2 Comparaison des méthodes

Si une solution analytique existe, la méthode la plus simple demeure l'application de la formule qui y est associée. Autrement, on doit se rabattre sur les méthodes numériques mais lorsque la grille est de taille trop importante, le choix d'une méthode de changement d'échelle plus rapide s'impose.

Plusieurs techniques de changement d'échelle ont été comparées par Renard et al. (1996). Parmi elles mentionnons:

- les moyennes arithmétiques, harmoniques, géométriques et les moyennes de puissances  $\frac{1}{2}$  et  $\frac{1}{3}$

- la renormalisation standard
- la renormalisation tensorielle
- la renormalisation simplifiée

Environ deux mille champs de conductivité hydraulique ont été synthétisés par simulation stochastique sur une grille de 128 x 128 x 64 éléments. Les valeurs de référence ont été calculées à l'aide de simulations d'écoulement par éléments finis et par différences finies. Les résultats ont été comparés notamment à l'aide de diagrammes de dispersion, par le calcul du biais relatif et par le coefficient de corrélation linéaire entre les valeurs de références et les valeurs déterminées par les différentes techniques.

Dans le cas de champs 3D hétérogènes ayant des dimension finies, les moyennes harmonique et géométrique ont sous-estimé la valeur de  $K_e$  tandis que la moyenne arithmétique l'a surestimé par rapport à la valeur de référence déterminée par éléments finis. Les moyennes de puissances montrent des écarts moins importants avec cette valeur de référence. Les différentes techniques de renormalisation ont donné de bons résultats. La renormalisation simplifiée a la moins grande dispersion et le biais le plus faible tout en étant très rapide.

## **2.3 Notions de géostatistique**

### **2.3.1 Concept de variable régionalisée**

La plupart des paramètres en hydrogéologie tels la conductivité hydraulique et le coefficient de dispersion varient d'un point à l'autre. Cette variation est habituellement structurée, d'où l'intérêt de caractériser cette variabilité (de

Marsily, 1981). La géostatistique utilise la théorie des variables régionalisées (Matheron, 1967; Journel et Huijbregts, 1978) comme approche pour caractériser les fluctuations des variables dans l'espace. Ainsi, un ensemble de valeurs distribuées dans l'espace est considéré comme une réalisation particulière d'une fonction aléatoire. Une fonction aléatoire consiste en une série de variables aléatoires ponctuelles ou locales. Chacune de ces variables aléatoires n'est en général pas totalement indépendante, mais liée aux autres variables locales par une corrélation caractérisée par la structure spatiale de la variable régionalisée.

Pour pouvoir déterminer la distribution d'une variable aléatoire en un point donné, il faudrait être en mesure d'obtenir plusieurs valeurs de cette variable. En pratique et dans le meilleur des cas, une seule donnée est disponible en chaque point d'observation. La variable est alors considérée comme entièrement déterminée en ce point et il n'est plus nécessaire d'en connaître la distribution. Dans la plupart des applications, la complète connaissance de la distribution spatiale n'est pas requise et l'hypothèse intrinsèque suffit. Cette hypothèse implique que l'espérance  $E\{ Z(x) \} = m$  existe sans égard à la position  $x$  et que le variogramme ne dépend que de la distance  $r$ .

### 2.3.2 Variogramme

Le variogramme est défini comme la variance de l'incrément (  $Z(x) - Z(x+r)$  ) :

$$\text{Var} \{ Z(x+r) - Z(x) \} = E \{ [ Z(x+r) - Z(x) ]^2 \} = 2\gamma(r) \quad ( 2.18 )$$

$$\gamma(r) = C(0) - C(r)$$

où  $r$  est la distance séparant deux observations,  $C(r)$  est la covariance et  $C(0)=\text{Var}(Z(x))$ , la variance globale de  $Z(x)$  (Deutsch et Journel, 1998). Le variogramme, qui est intimement lié à la fonction de covariance, permet de décrire les corrélations spatiales entre les variables aléatoires (Journel & Huijbregts, 1978).

L'application des techniques géostatistiques est toujours précédée d'une analyse structurale des variables à l'étude (Schafmeister et Burger, 1989). Le variogramme expérimental est estimé par:

$$\gamma_e(r) = \frac{1}{2N(r)} \sum_{(i,j) \in D(r)} [Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \quad (2.19)$$

où  $N(r)$  est le nombre de paires d'observations séparées d'une distance  $r$  et  $D(r)$ , l'ensemble des paires d'observations séparées d'une distance  $r$ . En pratique et dans le cas d'un échantillonnage irrégulier, il est nécessaire d'utiliser une tolérance sur  $r$  pour que le nombre de paires par point calculé soit suffisant.

L'ajustement d'un modèle sur les points du variogramme expérimental permet d'utiliser différentes techniques telles que le krigeage et la simulation stochastique. Il existe plusieurs critères qui permettent de vérifier l'admissibilité d'un modèle. Un des principaux critères est que la fonction soit positive définie pour la dimension considérée (Journel et Huijbregts 1978). La positivité de la transformée de Fourier du Laplacien du variogramme est une condition nécessaire et suffisante si:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\gamma(r)}{r^2} = 0 \quad (2.20)$$

De nouvelles fonctions de covariance et par extension, de variogrammes, peuvent être générées par transformée de Fourier inverse d'une fonction de densité spectrale positive dont l'intégrale existe. De plus, il existe un lien entre variogrammes à  $n$  dimensions et variogrammes à  $n-2$  dimensions. Si un modèle est admissible en  $R^n$ , on peut construire un nouveau modèle en  $R^{n-2}$  par (Christakos, 1984, 1992):

$$\gamma_{n-2}(r) = \gamma_n(r) + \frac{r}{n-2} \frac{d\gamma(r)}{dr} \quad (2.21)$$

Un modèle est habituellement composé d'une partie non structurée appelée effet pépité ( $C_0$ ) qui quantifie les fluctuations d'une variable régionalisée pour  $r \rightarrow 0$ . La partie structurée du variogramme augmente ensuite de manière asymptotique jusqu'à une distance appelée portée ( $r = a$ ) où le plateau ( $C + C_0$ ) est atteint. La valeur du plateau correspond généralement à la variance globale de la variable à l'étude. Pour des distances supérieures à la portée, il n'existe plus de corrélations entre deux observations. Un exemple de modèle de variogramme est le modèle exponentiel:

$$\gamma = C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(-\frac{r}{a}\right) \right] \quad (2.22)$$

qui sera fréquemment utilisé au cours de cette étude. Le même type de modèle a été utilisé par Renard *et al* (1996) dans une étude sur les changements d'échelle.

### 2.3.3 Krigage

Soit une variable aléatoire qu'on désire estimer à l'aide d'une combinaison linéaire de valeurs observées:  $Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i$  où les  $Z_i$  sont les valeurs observées et les  $\lambda_i$  le poids accordé à chacune des observations. La variance d'estimation est définie comme la variance de l'erreur d'estimation:  $E = Z_v - Z_v^*$ :

$$\begin{aligned} \text{Var}(E) &= \sigma_e^2 = \text{Var}(Z_v - Z_v^*) \\ &= \text{Var}(Z_v) + \text{Var}(Z_v^*) - 2\text{Cov}(Z_v, Z_v^*) \\ &= \text{Var}(Z_v) + \sum \sum \lambda_i \lambda_j \text{Cov}(Z_i Z_j) - 2 \sum \lambda_i \text{Cov}(Z_v Z_i) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Le krigage est un estimateur linéaire dont le but est de minimiser la variance d'estimation  $\sigma_e^2$ . Un estimateur sans biais doit respecter la condition:  $\sum \lambda_i = 1$ . La solution optimale est obtenue en formant le lagrangien qu'on minimise pour obtenir le système de krigage ordinaire:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j \text{Cov}(Z_i, Z_j) + \mu &= \text{Cov}(Z_v, Z_i) \\ \sum \lambda_i &= 1 \end{aligned} \quad (2.24)$$

où  $\mu$  est un multiplicateur de Lagrange,  $\text{Cov}(Z_i, Z_j)$  les covariances entre les observations et  $\text{Cov}(Z_v, Z_i)$ , les covariances entre les valeurs observées et le point à estimer. Le système décrit par ( 2.24 ) est solutionné pour les  $\lambda_i$  de l'estimateur. D'après la relation ( 2.18 ), les covariances dans ( 2.24 ) peuvent être remplacées par les valeurs de variogramme correspondantes sans affecter le résultat. La variance d'estimation, aussi appelée variance de krigage est donnée par:



$$\sigma_k^2 = Var[Z_v] - \sum_{i=1}^n \lambda_i Cov[Z_v, Z_i] - \mu \quad (2.25)$$

Si la moyenne "m" de la variable à estimer est connue, un estimateur sans biais appelé krigeage simple peut être formé sans imposer la contrainte que la somme des poids soit égale à 1:

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i\right) m \quad (2.26)$$

Le système de krigeage simple découle du lagrangien de la variance d'estimation de cet estimateur:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j Cov[Z_i, Z_j] = Cov[Z_v, Z_i] \quad (2.27)$$

Le krigeage produit une image lissée de la réalité. Cette image lissée peut amener une sous-estimation de la variabilité de la conductivité hydraulique ce qui peut avoir des conséquences importantes sur le calcul des vitesses de propagation et la dispersion des contaminants (Schafmeister et Burger, 1989).

#### 2.3.4 Simulations stochastiques

En contraste avec la moyenne mobile pondérée qu'est le krigeage, la simulation stochastique tient compte de la variabilité du phénomène spatial. Cette variabilité peut avoir un impact majeur dans le cas de paramètres non additifs tels que la conductivité hydraulique. La simulation stochastique est donc indiquée lorsqu'il est nécessaire de quantifier l'incertitude des résultats d'un modèle (Schafmeister et Burger, 1989).

La simulation stochastique est un processus de production de réalisations alternatives, équiprobables d'une variable régionalisée. Chaque réalisation est produite à partir d'un modèle de variogramme qui caractérise les valeurs connues sur le terrain (Davis, 1986).

Les simulations peuvent être conditionnelles ou non conditionnelles. La simulation non conditionnelle est une réalisation de la variable régionalisée qui ne respecte pas nécessairement les valeurs observées là où des observations sont disponibles. Plusieurs méthodes de simulation ne permettent que de produire des réalisations non conditionnelles qu'il faut par la suite adapter aux réalités observées. Le conditionnement consiste à transformer les valeurs simulées de manière à ce qu'elles respectent les valeurs connues. Certaines méthodes de simulation permettent de tenir compte de ces valeurs dites conditionnantes sans qu'il soit nécessaire d'effectuer un conditionnement a posteriori. C'est le cas notamment de la simulation séquentielle gaussienne et de la méthode LU (Deutsch et Journel, 1998).

Les méthodes de simulations sont très variées. Les plus utilisées sont les méthodes gaussiennes dont certains algorithmes sont décrits brièvement plus loin. Parmi les méthodes moins utilisées mais dignes de mention, citons les méthodes spectrales opérant dans le domaine des fréquences et la simulation par fractales aléatoires qui constitue, selon Deutsch et Journel (1998), une version améliorée des méthodes spectrales.

Les méthodes gaussiennes permettent de simuler des processus gaussiens. Aussi, est-il préférable d'effectuer une transformation de la variable à simuler lorsque la distribution de celle-ci s'éloigne d'une distribution normale, en particulier pour les simulations conditionnelles. C'est le cas notamment des

valeurs de conductivité hydrauliques qui présentent généralement une distribution lognormale.

#### ***2.3.4.1 Simulation séquentielle gaussienne***

La méthode séquentielle gaussienne simule une à une les valeurs en effectuant un tirage d'une  $N(m_c, \sigma_c^2)$  où  $m_c$  et  $\sigma_c^2$  sont les moyennes et variances conditionnelles aux points déjà simulés. On peut démontrer que ces deux valeurs correspondent à la valeur krigée et à la variance de krigeage du point à simuler dans le cas d'un krigeage simple. Le conditionnement est immédiat si les valeurs réelles sont incluses dès le départ dans l'ensemble des valeurs simulées. L'algorithme permet de simuler un grand nombre de données en effectuant une sélection du voisinage pour limiter la taille des matrices de krigeage.

#### ***2.3.4.2 Simulations par moyennes mobiles ou aléatoires***

Pour ces méthodes, des valeurs aléatoires indépendantes sont générées en 1D, 2D ou 3D. Pour la méthode des moyennes mobiles, des moyennes selon diverses fonctions de pondération sont effectuées. Il est possible de reproduire plusieurs modèles connus de fonctions de covariances. La difficulté réside dans la détermination de la fonction de pondération qui reproduit la fonction de covariance cherchée. La méthode des moyennes aléatoires fonctionne selon un principe semblable, à l'exception du fait que c'est le nombre de points poissonniens se trouvant à l'intérieur d'un certain rayon qui fait office de valeur simulée. Cette méthode simule la fonction de covariance sphérique en 3D, circulaire en 2D et linéaire en 1D. Dans l'application de ces méthodes, le conditionnement est effectué a posteriori.

#### **2.3.4.3 Bandes tournantes**

Le principe de cette méthode est de ramener des problèmes 3D et 2D à des problèmes 1D. Sur un certain nombre de droites générées dans l'espace, des valeurs présentant une certaine covariance sont simulées. Il faut déterminer quelle est la fonction de covariance 1D à utiliser pour obtenir la fonction 2D ou 3D voulue. Les points simulés dans l'espace correspondent à la somme des valeurs projetées perpendiculairement à chacune des droites. Un nombre insuffisant de lignes produira des artefacts dans les résultats. Traditionnellement, le nombre de droites est fixé à une quinzaine pour un problème 3D. On utilise maintenant un nombre beaucoup plus élevé (Lantuéjoul, 1993). L'algorithme est très rapide, mais la méthode n'offre pas de possibilité de conditionnement immédiat. Le conditionnement a posteriori atténue l'avantage de rapidité de calcul des bandes tournantes, sauf si le nombre de données est assez faible pour permettre un krigeage unique.

#### **2.3.4.4 Simulated annealing**

Il existe plusieurs variantes de cette méthode telles que Métropolis, échantillonneur de Gibbs et échanges successifs (Hegstad *et al.* 1993; Deutsch et Journel 1998). Le principe de base est de perturber un ensemble initial de données jusqu'à ce qu'il présente certaines caractéristiques représentées par une fonction objective. La technique présentée par Deutsch et Journel (1998) consiste à générer des valeurs aléatoires indépendantes, à partir d'un histogramme quelconque, pour chaque point à simuler. Les valeurs sont sélectionnées deux à deux et interverties. La modification du champ de valeurs est conservée si cette permutation fait diminuer la fonction objective. Certaines permutations sont acceptées même si elles font augmenter la fonction objective de manière à éviter l'arrêt de l'algorithme sur un optimum local. La probabilité

d'acceptation d'une telle augmentation décroît avec l'importance de l'augmentation et avec le nombre d'itérations. L'algorithme est répété jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible de faire diminuer la fonction objective. Le conditionnement est immédiat en incluant les observations dans l'ensemble de valeurs initiales et en imposant que ces valeurs ne soient pas déplacées. La méthode offre l'avantage de reproduire des caractéristiques très variées. C'est une méthode qui ne nécessite pas de transformation gaussienne préalable des données. Son principal inconvénient provient de la lenteur d'exécution.

#### **2.3.4.5 La méthode LU**

La méthode de simulation est basée sur la décomposition triangulaire supérieure et inférieure de la matrice des covariances. Cette décomposition est aussi connue sous le nom de décomposition de Cholesky ou LU. Elle permet la production simultanée de simulations conditionnelles ou non (Davis, 1986).

Par construction, la matrice des covariances points à points ( **C** ) de la grille de simulation est symétrique et positive définie. Elle peut donc être décomposée en un produit de deux matrices triangulaires, inférieure et supérieure. Étant donné que **C** est symétrique, la matrice inférieure est la transposée de la matrice supérieure:

$$\mathbf{C} = \mathbf{LU} \quad \text{et} \quad \mathbf{L}' = \mathbf{U} \quad (2.28)$$

Si l'on considère le vecteur :

$$\mathbf{z} = \mathbf{Ly} \quad (2.29)$$

où **y** est un vecteur de valeurs aléatoires indépendantes tirées d'une  $N(0,1)$ , l'espérance de **zz'** est donnée par:

$$\begin{aligned}
 E(\mathbf{z}\mathbf{z}') &= E(\mathbf{L} \mathbf{y}\mathbf{y}' \mathbf{U}) \\
 &= \mathbf{L} E(\mathbf{y}\mathbf{y}') \mathbf{U}
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

Comme  $\mathbf{y}$  est un vecteur de valeurs indépendantes  $N(0,1)$ ,

$$E(\mathbf{y}\mathbf{y}') = \mathbf{I} \tag{2.31}$$

la matrice identité, et finalement:

$$\begin{aligned}
 E(\mathbf{z}\mathbf{z}') &= \mathbf{L}\mathbf{U} \\
 &= \mathbf{C} \\
 &= \mathbf{C}
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

Le vecteur  $\mathbf{z}$  est donc un ensemble de valeurs simulées aux points de la grille et qui a  $\mathbf{C}$  comme matrice de covariances.

Pour effectuer une simulation conditionnelle, la matrice  $\mathbf{C}$  est construite en incluant les covariances entre les points d'observation:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} \\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{22} \end{bmatrix} \tag{2.33}$$

où  $\mathbf{C}_{11}$  est la matrice des covariances entre les observations,  $\mathbf{C}_{12}$  la matrice des covariances entre les observations et les points de la grille à simuler et  $\mathbf{C}_{22}$  la matrice des covariances entre les points de la grille. La décomposition LU de cette matrice donne:

$$\mathbf{C} = \mathbf{L}\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{11} & \mathbf{0} \\ \mathbf{L}_{21} & \mathbf{L}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{22} \end{bmatrix} \text{ et} \tag{2.34}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{11} & \mathbf{0} \\ \mathbf{L}_{21} & \mathbf{L}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

où  $\mathbf{y}_1$  et  $\mathbf{y}_2$  sont des vecteurs de valeurs indépendantes  $N(0,1)$ , est une simulation non conditionnelle de la fonction aléatoire donnée aux points de la grille et des observations. La simulation conditionnelle est obtenue en remplaçant  $\mathbf{y}_1$  par  $\mathbf{v}_1$  donné par:

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{L}_{11}^{-1} \mathbf{z}_1 \quad (2.36)$$

où  $\mathbf{z}_1$  est le vecteur des valeurs conditionnantes. Les valeurs simulées conditionnées  $\mathbf{z}_2$  sont alors obtenues par:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{11} & \mathbf{0} \\ \mathbf{L}_{21} & \mathbf{L}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{11}^{-1} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{y}_2 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$\mathbf{z}_2 = \mathbf{L}_{21} \mathbf{L}_{11}^{-1} \mathbf{z}_1 + \mathbf{L}_{22} \mathbf{y}_2 \quad (2.38)$$

Pour des grilles de petite taille, la méthode LU s'avère très rapide (Deutsch et Journel, 1998). Son utilisation est toutefois limitée à quelques centaines de points car toutes les valeurs doivent être simulées en même temps. La matrice  $\mathbf{C}$  prend ainsi rapidement des proportions qui dépassent les capacités des ordinateurs actuels. Un grand nombre de simulations peut être généré très rapidement en produisant différents vecteurs de nombres aléatoires  $\mathbf{y}$ . Pour cette raison, elle est particulièrement indiquée dans l'étude des changements d'échelle. La matrice  $\mathbf{L}$  demeure la même pour chaque simulation.

Une méthode de simulation par fenêtres à bandes de recouvrement peut être utilisée pour simuler des grilles de taille plus importante (Alabert 1987).

Malheureusement cette méthode crée des discontinuités indésirables, en particulier lorsque les points de conditionnement sont clairsemés et que la continuité spatiale a une grande portée.

La composante aléatoire  $y$ , tirée d'une distribution normale induit, en vertu du théorème de la limite centrale, une forte allure gaussienne aux résultats. Il est par conséquent préférable de travailler avec des valeurs normalisées.

## **2.4 Propriétés géotechniques des résidus miniers**

### **2.4.1 Propriétés générales**

Les rejets provenant de l'exploitation d'une mine comprennent le mort terrain, les stériles et les rejets du concentrateur (L'Écuyer *et al.*, 1992). Les rejets du concentrateur sont composés de roches finement broyées desquelles ont été extraites les substances à valeur commerciale (Vick, 1983; Aubertin, 1991). À la sortie du concentrateur, ces résidus apparaissent sous forme de pulpe ou de boues contenant de 40 à 50% de matière solide. Les résidus sont acheminés vers un bassin de rétention par des conduites forcées. Ils sont ensuite épandus dans un bassin de rétention grâce à des lances ou à des hydrocyclones disposés en un point unique ou en des points multiples.

Cette méthode de mise en place des matériaux induit une forte hétérogénéité zonale au dépôt. La pulpe projetée de son point d'épandage se répand dans un flux turbulent. Les particules plus grossières ont tendance à se déposer plus rapidement. Celles-ci s'accumulent plus près du point de décharge. Les particules fines restent en suspension plus longtemps et se déposent à plus



grande distance. La pente du dessus des dépôts varie de 0.5 à 20% selon la densité des pulpes. Cette pente diminue avec la distance du point de rejet.

Les épandages cycliques de pulpe créent une stratification importante des matériaux du dépôt. Bien que la démarcation entre les lits soit continue, cette stratification est visible à l'œil nu. L'épaisseur des strates est très variable. La moyenne de leur épaisseur est de l'ordre du centimètre. (L'Écuyer *et al.*, 1992). La granulométrie est assez étendue, allant de sables bien gradués à fines consolidées. Le contenu en fines est toutefois généralement élevé avec plus de 70% de particules inférieures à 80  $\mu\text{m}$ . Les résidus sont composés de roche finement concassée et contiennent peu de minéraux argileux. Par conséquent, leur cohésion est faible et souvent nulle.

La conductivité hydraulique des résidus miniers peut varier sur 5 ordres de grandeur ( $1 \times 10^{-4}$  à  $1 \times 10^{-9}$  m/s). Cette conductivité hydraulique demeure toutefois assez faible. En raison de leur accumulation graduelle le degré de consolidation des résidus augmente avec la profondeur. Cette consolidation implique une diminution de la proportion des vides. Par conséquent la conductivité hydraulique diminue en profondeur (équation 2.6 ). La conductivité hydraulique diminue aussi dans les zones éloignés des points de décharge des résidus en raison de la ségrégation des particules fines et grossières.

L'anisotropie structurale prononcée induit une anisotropie de conductivité hydraulique ( $K_h / K_v$ ) de l'ordre 2 à 10 pour les plages uniformes et jusqu'à 100 dans les zones intermédiaires en raison de l'entrelacement des couches fines et grossières (Vick, 1983). L'anisotropie aurait tendance à augmenter avec la profondeur. L'anisotropie mesurée sur des échantillons de petite taille est généralement plus faible. Dans les études d'écoulement sur les résidus miniers,

on estime généralement que l'anisotropie est comprise entre 10 et 100 (L'Écuyer, Chapuis et Aubertin, 1993).

#### **2.4.2 Le site de Solbec et Cupra**

Les données qui serviront de point de comparaison dans le cadre de ce projet proviennent d'essais de perméabilité effectués sur le site du parc à résidus des mines Solbec et Cupra, situé à environ 110 km au sud de la ville de Québec et à 70 km au nord-est de la ville de Sherbrooke (Figure 2.2). Plus de 4 millions de tonnes de résidus miniers y ont été entreposés entre 1962 et 1977. L'épaisseur des résidus atteint 9 mètres et le dépôt s'étend sur 63 hectares. Les résidus à la sortie du concentrateur ont été classifiés par cyclonage hydraulique. La partie grossière était récupérée pour servir de remblai sous terre tandis que la partie fine était envoyée au parc à résidus. Le point de décharge était vraisemblablement unique mais il devait être déplacé régulièrement pour assurer une meilleure répartition des résidus sur le site (Chapuis, L'Écuyer et Aubertin, 1993).

Les résidus sont composés en grande partie de sulfures massifs. L'oxydation des sulfures en contact avec l'air provoque l'acidification de l'eau des effluents à la sortie du parc à résidus. Ces effluents se chargent alors en métaux lourds (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) qui représentent de 2 à 5% des résidus et qui sont solubles en milieu acide. Cette acidification donne lieu à de nombreuses préoccupations environnementales. Plusieurs études ont été menées pour réduire le drainage minier acide sur le site (Aubertin et al., 1993; Bussière, 1993).

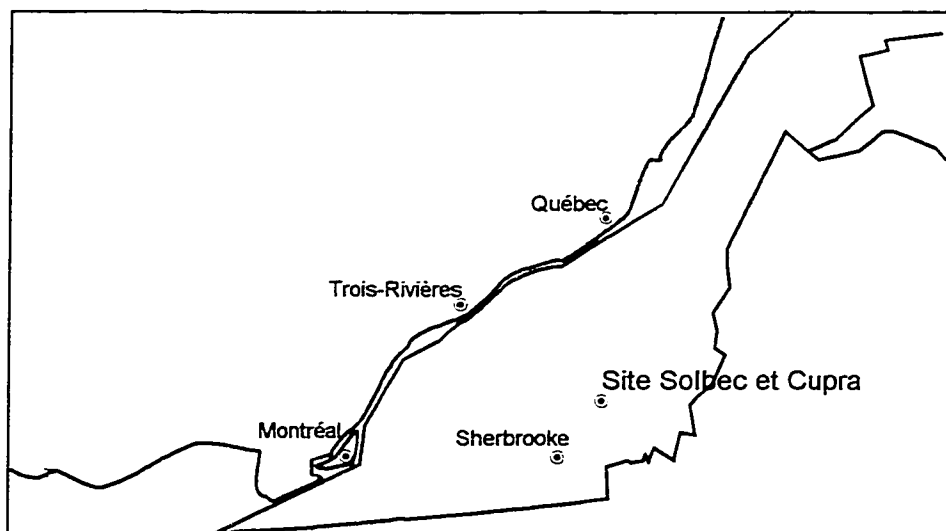


Figure 2.2 Localisation du site de Solbec et Cupra

#### **2.4.2.1 Essai au PERMAC**

Le PERMAC (Figure 2.3) est un perméamètre auto-foreur qui permet effectuer des essais de conductivité hydrauliques en place. L'appareil a été développé par Roctest pour ensuite être modifié par l'École Polytechnique afin de le rendre utilisable dans les sols à granulométrie fine tels que les résidus miniers (Morin 1992).

Ses principales caractéristiques sont de disposer d'une membrane interne qui bloque les orifices de la zone d'injection durant le forage de manière à éviter que celle-ci ne se colmate. De plus, sa trousse coupante est inversée et avancée par rapport à l'outil désagregateur. Ceci permet d'enfoncer l'appareil en minimisant le remaniement du sol à l'avant et sur les côtés du forage. Les jets d'eau servant à remonter vers la surface les particules dégagées, sont orientées à 45 degrés vers le haut plutôt que vers le bas comme dans la plupart des outils de ce genre. Cette modification a aussi pour but de minimiser le lessivage et le remaniement du sol à l'avant et sur les côtés de l'appareil.

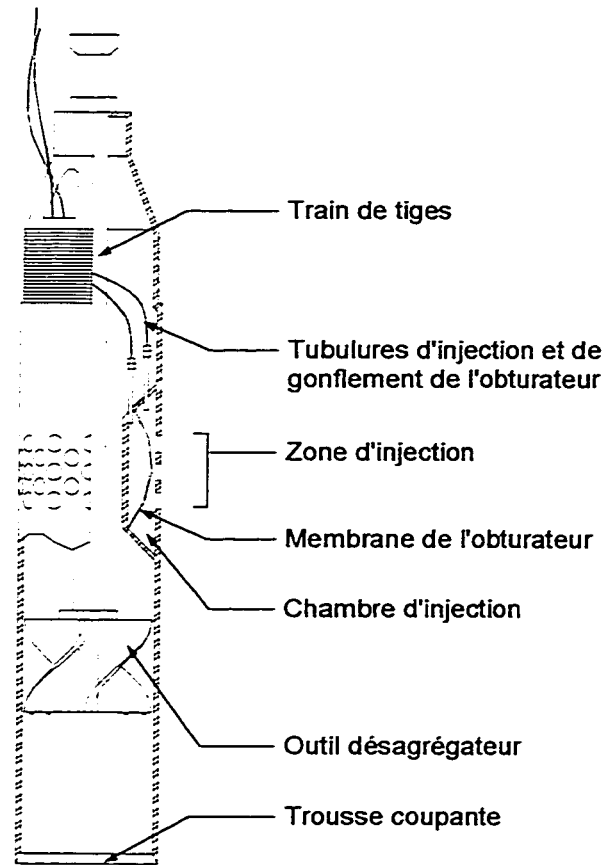


Figure 2.3 Schéma du PERMAC utilisé par Chapuis *et al.* (1992)

La zone d'injection est composée d'une série de 60 orifices d'un diamètre de 9,0 mm, répartis en 5 rangées sur une hauteur totale de 39,92 mm (Figure 2.4). Le diamètre du perméamètre est de 73,26 mm.

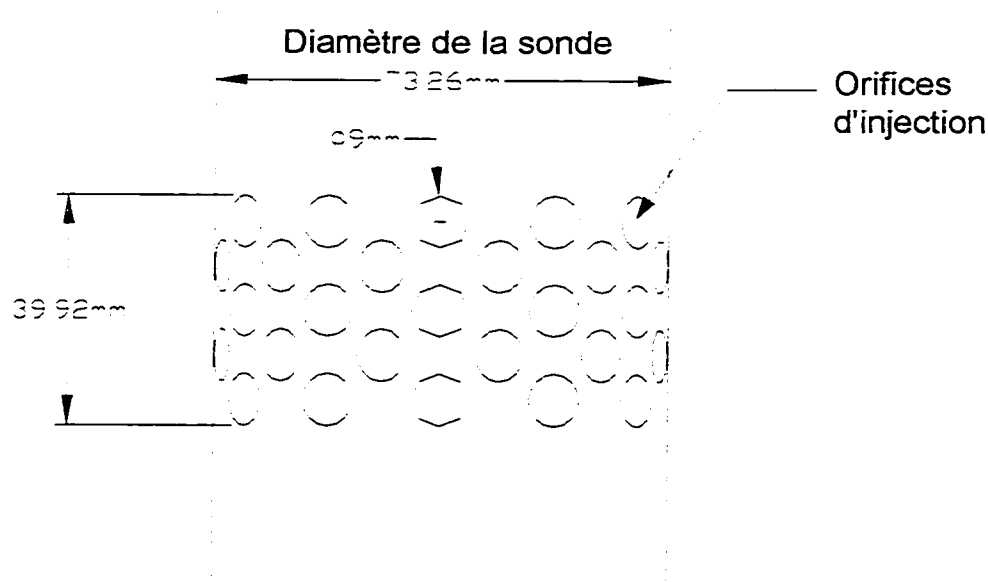


Figure 2.4 Détail de la zone d'injection du PERMAC

Les essais de perméabilité effectués par Morin (1992) à l'aide du PERMAC sont des essais à charge variable contrôlés à partir de la surface. Les volumes de liquide injectés sont mesurés grâce à des burettes (Norme CAN/BNQ 2501-135). Des essais ont été effectués dans deux forages distants d'une centaine de mètres sur le site de SOLBEC et Cupra. Les essais ont été interprétés par la méthode des vitesses (Chapuis, 1989) qui permet de déceler et de corriger les erreurs associées à une mauvaise estimation du niveau piézométrique initial. La zone d'injection du PERMAC est semblable à celle d'un essai de type Lefranc (Lefranc, 1936) à l'exception du fait que le fond est imperméable et que le rapport de la longueur sur le diamètre ( $L/D$ ) est inférieur à 1. Cette géométrie suggère l'emploi d'une approximation dite sphérique plutôt qu'une approximation de forme ellipsoïdale (Hvorslev, 1951). La correction attribuable au fond imperméable correspond à  $2,75D$  et le facteur géométrique à utiliser s'obtient par principe de superposition:

$$c = 2\pi D [L/D + 0,25]^{0.5} - 2,75 D \quad (2.39)$$

L'intervalle de profondeur des essais est de 25 cm. Les résultats sont présentés en annexe. Le variogramme des résultats a été calculé et est présenté à la Figure 2.5. Les données des deux forages ont été combinées dans le même variogramme pour augmenter le nombre de paires par point. La distance entre les deux forages a été prise en considération pour qu'aucune paire de valeurs provenant de deux forages différents n'entre dans le calcul du variogramme expérimental. Le modèle ajusté est de type exponentiel avec  $C_0 = 0.02$ ,  $C = 0.2$  et  $a = 1.65$  (équation 2.22).

#### **2.4.2.2 Essais en bout de tubage**

La méthode en bout de tubage a été développée pour obtenir des valeurs de conductivité hydraulique rapidement et à faible coût. Elle s'effectue en cours de forage. Celui-ci est interrompu à la profondeur désirée. L'outil désagregateur et son train de tiges sont retirés pour permettre la réalisation de l'essai par injection d'eau (Norme CAN/BNQ 2501-130).

Les essais en bout de tubage ont été faits à l'aide d'un tubage d'un diamètre extérieur de 46 mm muni d'une trousse coupante inversée. Le déroulement et l'interprétation des essais sont semblables à ceux des essais au PERMAC. Les résultats apparaissent en annexe. Le variogramme des résultats apparaît à la Figure 2.5. Comme dans le cas du PERMAC, les résultats des deux sites de forages ont été combinés dans le même variogramme. Le modèle ajusté est de type exponentiel avec  $C_0 = 0.21$ ,  $C = 0.25$  et  $a = 1.6$  m (équation 2.22).

### ***2.4.2.3 Estimation de l'anisotropie***

L'orientation des zones d'injection des deux types d'essais effectués sur le site permet de croire qu'il serait possible d'estimer l'anisotropie de conductivité hydraulique par comparaison des résultats. En effet, la zone d'injection du PERMAC est horizontale tandis que celle du bout de tubage est verticale. Cette hypothèse a amené Morin (1992) à faire le rapport des conductivités hydrauliques obtenues par les deux séries d'essais. Pour ce faire, il a effectué un krigeage des valeurs de conductivité hydraulique pour en faire ressortir la tendance. Il a ensuite estimé que la valeur minimale de l'anisotropie devait correspondre au rapport entre les valeurs krigées maximale du PERMAC et minimale du bout de tubage. L'anisotropie ainsi trouvée était de  $K_h/K_v = 3$  environ.

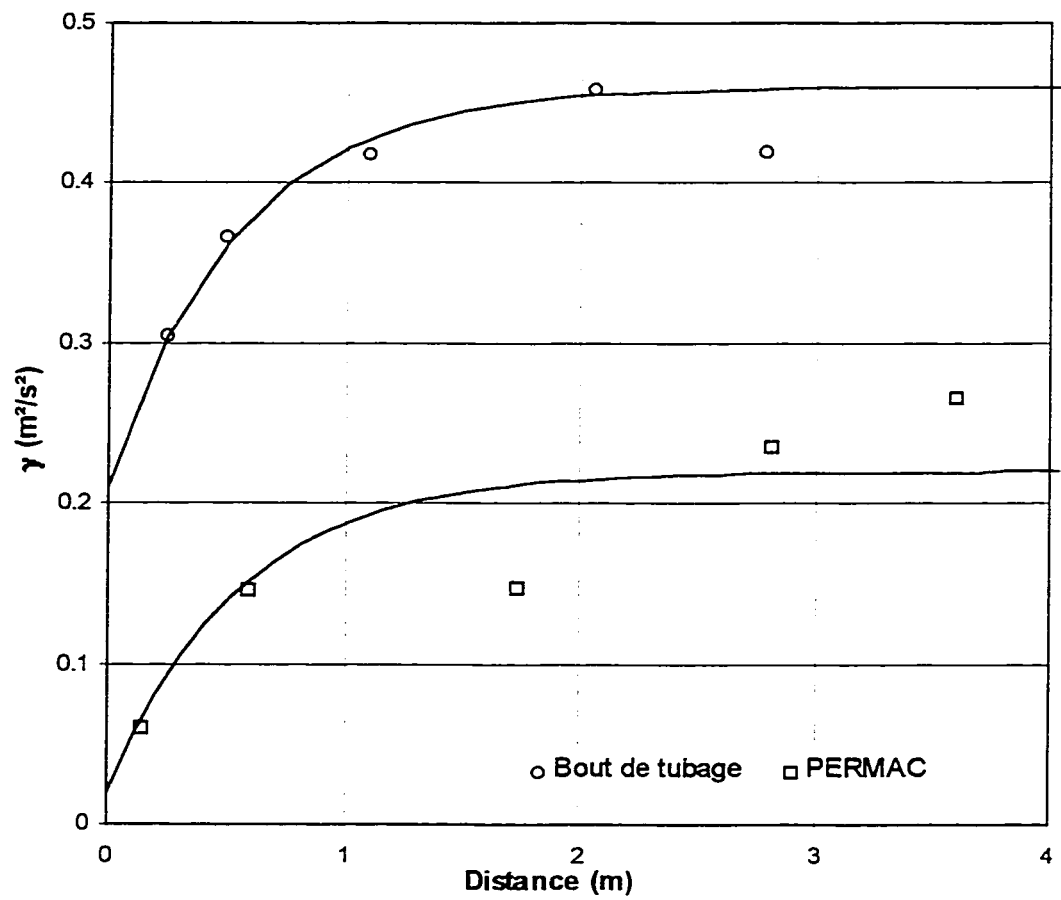


Figure 2.5 Variogrammes du logarithme des valeurs de conductivités hydrauliques mesurées au site de Solbec et Cupra (Morin 1992)



## **CHAPITRE III**

### **STRUCTURE SPATIALE INDUITE PAR LA GÉOMÉTRIE DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ EN PLACE**

#### **3.1 Modélisation d'essais de perméabilité en place**

La modélisation d'essais de perméabilité en place est effectuée dans le but de reproduire les conditions qui ont causé l'obtention de différents résultats pour les deux types d'essais effectués sur le site de site de Solbec et Cupra. Les valeurs de conductivité hydraulique sont générées par des simulations stochastiques. Les valeurs de conductivité hydraulique résultantes sont calculées à partir du débit total des essais en régime permanent.

##### **3.1.1 Simulation par éléments finis: SEEP Windows**

SEEP/W est un logiciel de simulation d'écoulement développé par GEO-SLOPE International. Il permet de résoudre des problèmes d'écoulement à deux dimensions par la technique des éléments finis et est doté d'une interface graphique WINDOWS ce qui facilite son utilisation par la visualisation rapide des conditions frontières et des matériaux utilisés. Outre les modèles à deux dimensions en régime permanent ou transitoire, il est aussi possible de résoudre des problèmes à trois dimensions ayant un axe de symétrie. C'est le cas, par exemple, des problèmes qui impliquent un puits de pompage.

Le fichier de paramètres utilisé par le module de résolution SOLVE peut rapidement être créé à l'aide du module SEEP DEFINE. En outre, il est possible de créer ou de modifier ce fichier grâce à un éditeur de texte ou tout autre logiciel qui permet d'éditer des fichiers ASCII.

### 3.1.2 Détermination de la conductivité hydraulique d'un essai

La conductivité hydraulique d'un essai par modélisation numérique est obtenue à partir du débit total circulant au travers du modèle soumis à un certain gradient hydraulique. Le débit total est obtenu par sommation des débits nodaux. Dans SEEP, ce débit peut être obtenu grâce à une section de flux. La section de flux est un plan imaginaire placé à l'endroit voulu sur le modèle.

Pour déterminer le facteur géométrique inhérent au modèle, une simulation d'écoulement est effectuée en affectant à tous les éléments une conductivité hydraulique constante. Les débits  $Q$  entrant et sortant du modèle sont mesurés et la relation ( 2.7 ) permet de déduire le facteur  $c$ . Par la suite, les valeurs de conductivité résultant de chaque simulation d'écoulement sont obtenues en utilisant ce même facteur géométrique. Cette constante est caractéristique du modèle numérique créé et dépend de la forme de la zone d'injection, de la distance des conditions frontières et de la forme du réseau d'écoulement durant l'essai. À ce titre, on doit formuler l'hypothèse qu'en moyenne, le réseau d'écoulement demeure semblable pour tous les essais.

### 3.1.3 Modèle du dépôt

Les observations faites à partir des échantillons prélevés sur le site de Solbec et Cupra (L'Écuyer *et al.* 1992) révèlent des stratifications dont l'épaisseur est de l'ordre du centimètre. Bien que l'épaisseur réelle des strates puisse varier, les éléments du modèle ont une épaisseur fixée à 1 cm. Les variations de l'épaisseur des strates influencent le comportement à petite échelle du variogramme la conductivité hydraulique. Ces variations d'épaisseur ne sont

pas représentées par le modèle en éléments finis. Ils seront prises en charge par le variogramme ponctuel de la conductivité hydraulique.

Le modèle du dépôt est de type axisymétrique. Ce type de modèle peut être utilisé puisque le forage représente un axe de symétrie radial. Cette configuration permet de traiter un problème à trois dimensions par un modèle à deux dimensions. Dans ce type de modèle, les éléments ont une profondeur de 1 radian. Le débit total est obtenu en multipliant les débits obtenus par  $2\pi$ .

Les extensions latérales et verticales du modèle doivent être fixées de manière à ce que les frontières soient assez éloignées du point d'injection pour que l'interférence soit réduite au minimum. De plus, les conditions frontières doivent produire un réseau d'écoulement semblable en milieu homogène et hétérogène pour que le facteur géométrique soit représentatif. Pour ce faire, des valeurs ont été simulées à partir du modèle de variogramme quasi ponctuel décrit à la section 3.1.4.2. Les conditions frontières ont d'abord été établies de manière à produire un gradient hydraulique radial à peu près uniforme sur tout le domaine (charges constantes à la base, au sommet et à l'extrémité extérieure du modèle). L'anisotropie structurale induite par les strates force les lignes de courant à s'incurver parallèlement à celles-ci. Le débit, qui est radial à la sortie de la zone d'injection, devient pratiquement horizontal à une certaine distance. Des strates ont été ajoutées au modèle jusqu'à ce que moins de 1% du débit total ne passe par les frontières de la base et du sommet. Le nombre de strates de 1 cm a ainsi été fixé à 200. L'extension latérale a été fixée à 1 m. Les conditions frontières à la base et au sommet ont ensuite été modifiées pour la détermination des facteurs géométriques.

La figure 3.1 montre l'ensemble du modèle avec la zone d'injection propre au PERMAC. Les frontières à la base et au sommet sont à débit nul  $Q = 0$ .

L'extrémité droite est à charge constante  $H = 2.0\text{m}$ . Certains symboles de conditions frontières ont été omis pour plus de clarté. La même fonction de conductivité hydraulique est attribuée à tous les éléments d'une même ligne. Chaque ligne possède une fonction de conductivité hydraulique propre. Les simulations sont en régime permanent et milieu saturé. Le nombre total d'éléments s'élève à 2700.

Le modèle construit est une coupe verticale du dépôt. L'extension latérale du modèle se limite au rayon d'influence potentiel d'un essai de perméabilité. Le but de ce modèle n'est pas de représenter l'ensemble d'un parc à résidus minier. Il se limite à décrire le dépôt à la verticale d'un point donné.

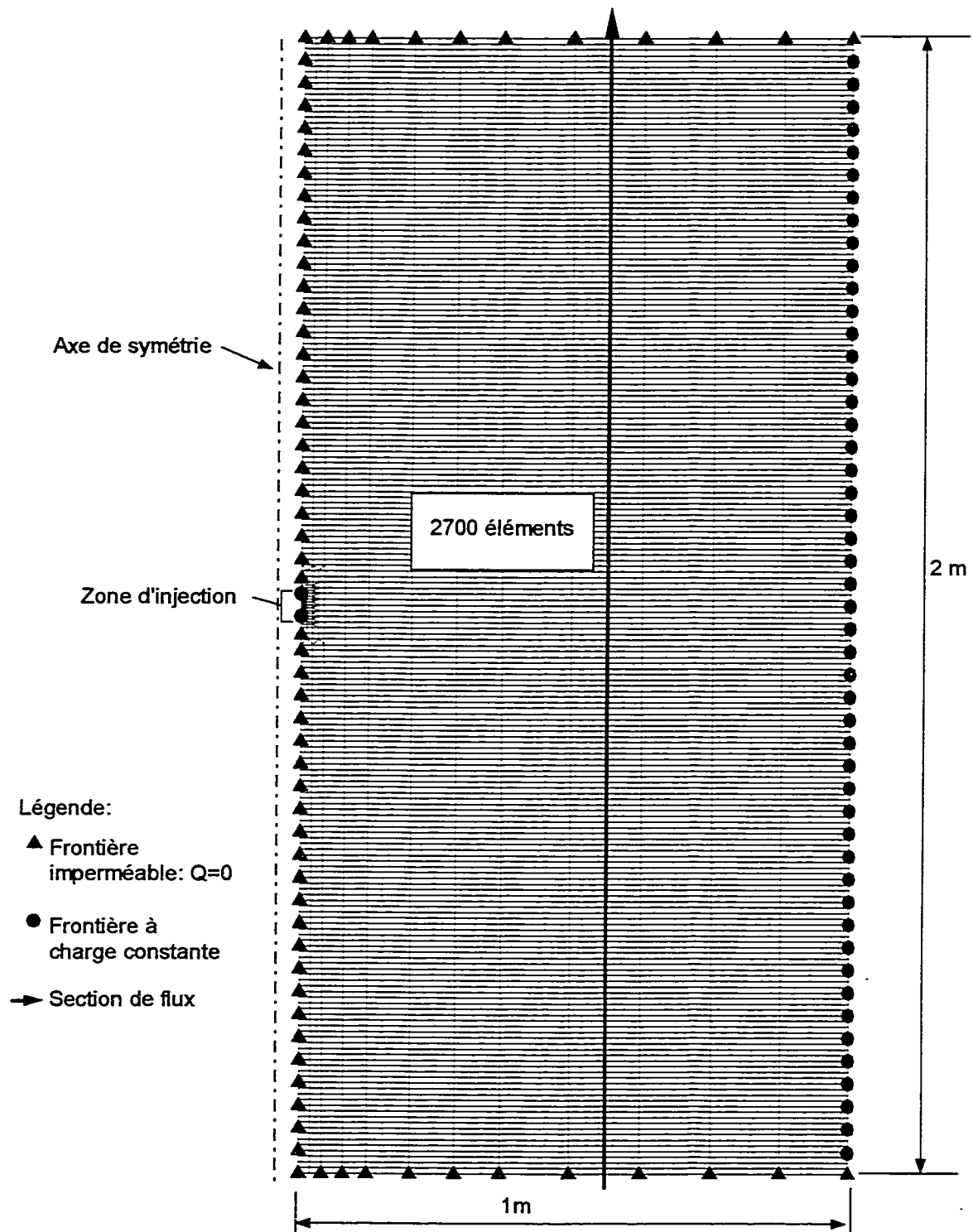


Figure 3.1 Modèle numérique du dépôt

### 3.1.3.1 PERMAC

Le PERMAC, dont la géométrie détaillée est décrite à la section 2.4.2.1, a été modélisé par une frontière à charge constante de 4 cm de haut située à un rayon de 4 cm de l'axe de symétrie ce qui correspond approximativement aux dimensions de la zone d'injection de l'appareil. Les détails du maillage et des conditions frontières de la zone d'injection apparaissent à la Figure 3.2. Le modèle dans son ensemble est celui qui est présenté à la figure 3.1. Le maillage a été raffiné près de la zone d'injection de manière à minimiser l'erreur numérique. La charge imposée au point d'injection est de  $H = 2.1$  m. La charge de sortie est fixée à  $H = 2.0$  m pour créer un gradient moyen de  $i = 0.1$ . Le facteur géométrique a été déterminé en appliquant une conductivité hydraulique uniforme  $K = 1 \times 10^{-6}$  m/s à l'ensemble des éléments. La valeur ainsi obtenue est  $c = 6.02 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>. Cette constante équivaut à une portion du modèle d'un radian de profondeur. Le coefficient pour un modèle circulaire est donc de  $c = 0.378$ . L'équation 2.39 (Hvorsév, 1951) permet de calculer théoriquement un facteur de forme en milieu homogène et infini. Pour la configuration d'essai du PERMAC, cette valeur aurait donné,  $c = 0.215$ . Le facteur géométrique du modèle numérique présente donc une différence relative de plus de 40% par rapport au facteur géométrique théorique.

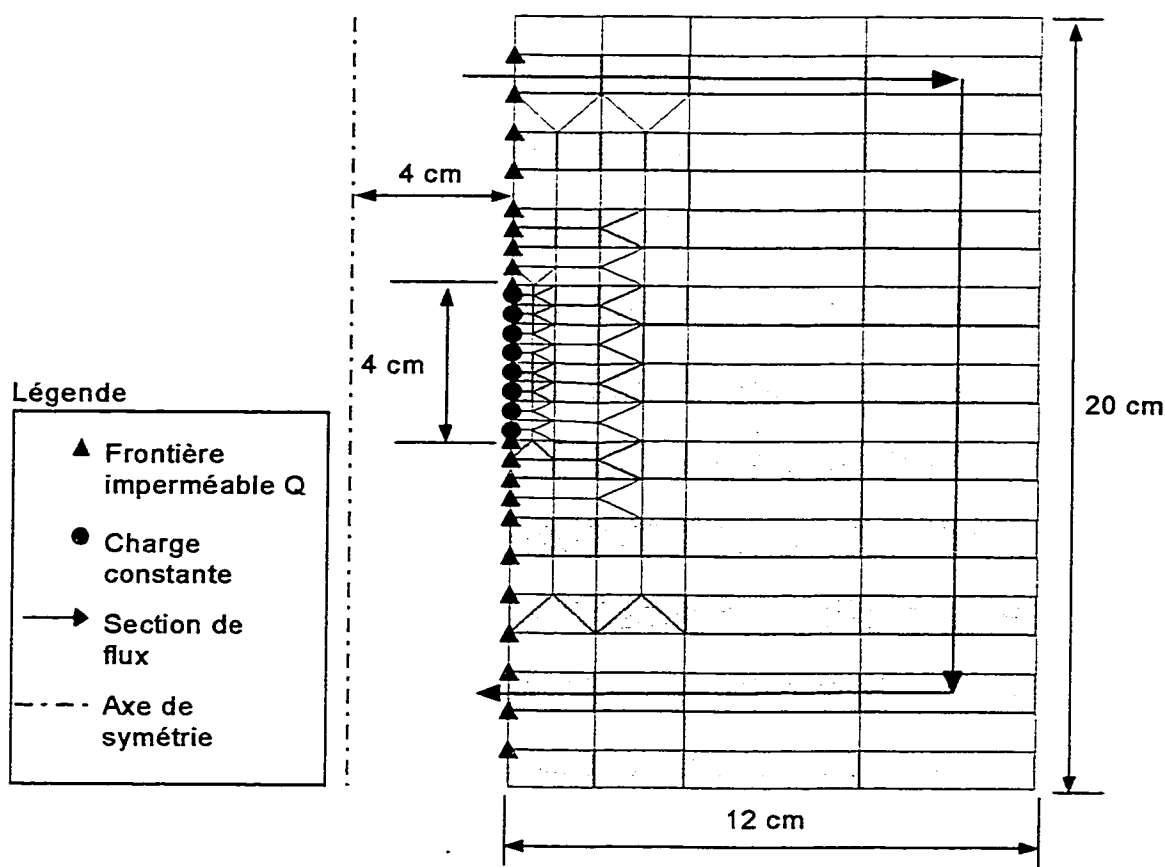
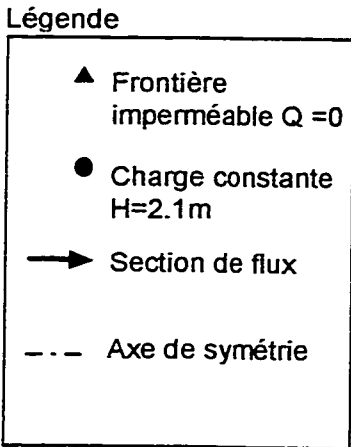


Figure 3.2 Modèle SEEP/W de l'essai au PERMAC, détail de la zone d'injection

### 3.1.3.2 Bout de tubage

La Figure 3.3 montre le détail de la zone d'injection du modèle du bout de tubage. Il est constitué d'une frontière à charge constante de 23 mm de large orientée vers le bas représentant le bout du tubage ouvert. Le tubage plein est représenté par une frontière à débit nul  $Q = 0$ . Le modèle dans son ensemble est semblable à celui de la figure 3.1. Le facteur géométrique a été déterminé en appliquant une conductivité hydraulique uniforme  $K = 1 \times 10^{-6}$  m/s à l'ensemble des éléments. La valeur ainsi obtenue est  $c = 2.44 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>. Cette constante doit être multipliée par  $2\pi$  pour un modèle trois dimension. On obtient



### 3.1.4 Simulation stochastique des valeurs de conductivité hydraulique

Deux séries de simulations ont été effectuées. La première a pour but de vérifier de quelle façon la partie structurée du variogramme des valeurs de strates est modifiée par le type d'appareil de mesure. La seconde a été



effectuée à partir d'un modèle de variogramme semblable à celui que pourrait être le variogramme ponctuel pour le dépôt de Solbec et Cupra en se basant sur les variogrammes des essais effectués sur le site.

#### **3.1.4.1 Simulation sans effet pépité**

Une première série de simulations a été faite à partir d'un modèle de variogramme sans effet pépité. Le modèle simulé est de type exponentiel avec une portée  $a = 1.0$  m, soit la moitié de la hauteur totale du modèle. La covariance a été fixée à  $C = 1$ . Quatre vecteurs de 2000 valeurs ont été simulés sur un intervalle de 0.01 mètre pour être assignées aux strates du modèle. La moyenne géométrique des valeurs de conductivité hydraulique a été fixée à  $K = 1 \times 10^{-6}$  m/s.

La méthode retenue pour effectuer les simulations est la méthode LU. La routine MATLAB utilisée apparaît en annexe. Cette méthode a été sélectionnée pour sa simplicité et parce qu'elle permet la simulation simultanée de toutes les valeurs du champ. Le nombre limité de points à simuler autorise son emploi sans que les limites d'un ordinateur conventionnel ne soient atteintes.

#### **3.1.4.2 Simulation avec effet pépité**

Le variogramme de  $K$  à l'échelle des strates est inconnu. Son estimation repose d'avantage sur une approche par essais erreurs que sur un calcul précis. On sait toutefois que dans un milieu à stratification horizontale, la zone d'injection d'un essai en bout de tubage émerge dans une seule strate. Si la zone d'influence d'un essai en bout de tubage s'étend au delà de la strate dans laquelle le bout du tubage se trouve, cette strate exerce néanmoins une forte influence sur la structure spatiale des résultats. Cette hypothèse sera vérifiée à

la section 4.3. La partie structurée du variogramme de la conductivité hydraulique des strates sera vraisemblablement assez semblable à celle des valeurs obtenues par essais en bout de tubage. Par contre, l'effet pépité sera plus important puisque le volume considéré est plus petit. On ne tient pas compte ici de l'importance des erreurs d'interprétations et de lectures qui peuvent être très importantes et même constituer la majeure partie de l'effet pépité du variogramme des essais.

Le variogramme utilisé pour simuler les valeurs de conductivité hydraulique des strates est basé sur le variogramme des résultats obtenus sur le site de Solbec et Cupra pour les essais en bout de tubage (Morin, 1992). Ce modèle était de type exponentiel avec  $a=1.6\text{m}$ ,  $C=0.25$  et  $C_0=0.21$ . La partie structurée est conservée mais l'effet pépité est augmenté. Le modèle utilisé est de type exponentiel avec une portée de 1.6 mètres. L'effet pépité a été fixé à  $C_0 = 0.3$  et la partie structurée à  $C = 0.3$ . Le plateau s'élève donc à 0.6. Ainsi, la variance globale du logarithme de la conductivité hydraulique simulée sera de 0.6. Cette variance globale sera observée pour des valeurs distantes de plus de 1.6 mètres. La variance à petite échelle a quant à elle une intensité de 0.3.

La méthode LU a été utilisée pour simuler douze vecteurs de 1000 valeurs du logarithme de la conductivité hydraulique. Les simulations sont non conditionnelles. L'espérance des valeurs simulées est fixée à  $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  ce qui correspond à la moyenne des valeurs mesurées sur le site. Pour obtenir des valeurs ayant cette moyenne, les simulations sont d'abord effectuées en considérant une moyenne logarithmique de 0. Les valeurs simulées ont la alors la variance et le variogramme souhaité et les valeurs de logarithme sont décalées de -6. La Figure 4.2 montre les variogrammes des 12 simulations.

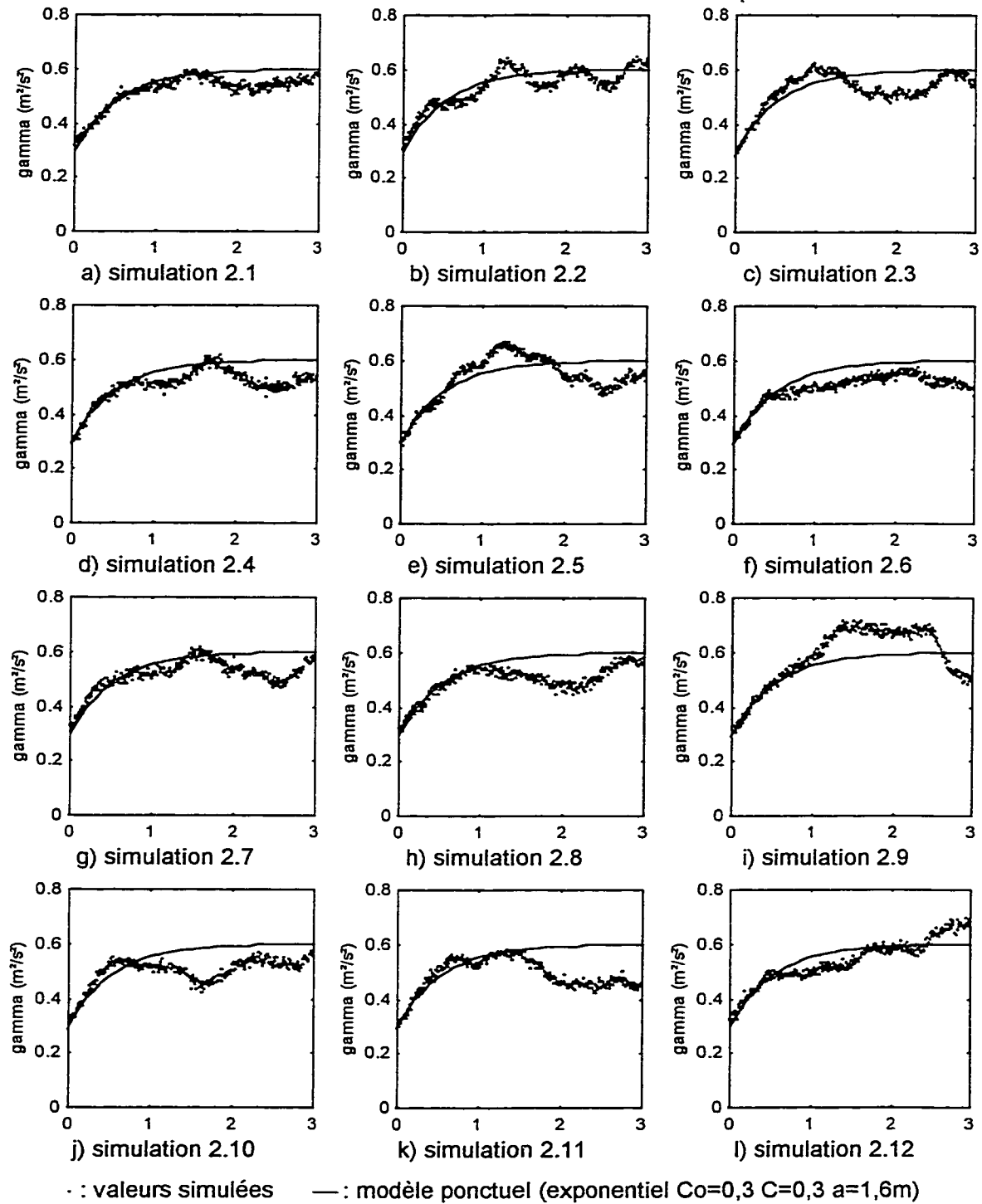


Figure 3.4 Variogrammes des 12 simulations de 1000 valeurs ponctuelles de conductivité hydraulique ( $\log_{10} K$ ) pour le modèle avec effet pépite.

### 3.1.5 Production de fichiers de paramètres et simulation des essais

Le logiciel SEEP/W utilise des fonctions de conductivité hydrauliques ( $K$  vs Pression) plutôt que des valeurs de conductivité hydrauliques individuelles. Cette caractéristique donne des résultats plus réalistes en milieu non saturé. Dans le cas présenté ici, le milieu est saturé et il n'est pas nécessaire de tenir compte de la fonction de conductivité hydraulique. Dans pareil milieu, la conductivité hydraulique peut être considérée comme constante. Cette approximation est valable seulement en régime permanent et lorsque le coefficient d'emmagasinement n'est pas pris en considération (équation 2.5).

La modification des valeurs de conductivité hydraulique en fonction des valeurs simulées et des essais à différentes profondeurs est effectuée par des routines qui ont été écrites pour créer des fichiers de paramètres à partir d'un tableur. Les macros qui apparaissent en annexe, permettent de changer rapidement les valeurs de conductivité hydraulique provenant d'un fichier externe. Elles permettent ensuite d'enregistrer un nouveau fichier pour chaque ensemble de valeurs. Les fichiers sont créés en décalant à intervalle voulu le vecteur de valeurs simulées par rapport au modèle.

Dans le cas des simulations sans effet pépité, 50 simulations d'écoulement ont été effectuées pour chacun des 4 vecteurs de conductivité hydraulique. Les 200 valeurs de conductivité hydraulique assignés aux strates du modèle ont été obtenues en décalant le vecteur simulé par intervalle de 10 cm.

Pour les simulations avec effet pépité, les fichiers de paramètres ont été enregistrés à des intervalles de 25 cm, ce qui correspond à la fréquence des essais effectués sur le site. Trente-deux simulations d'écoulement ont été

calculées pour chacun des 12 vecteurs de conductivités hydrauliques de strates.

À chaque simulation, le logiciel donne les résultats de débit par l'entremise d'un fichier. Un programme apparaissant en annexe permet de compiler les valeurs de débit en spécifiant le nom des fichiers qui les contiennent.

### **3.2 Changement d'échelle**

Pour effectuer un calcul de changement d'échelle, une procédure souvent employée consiste à simuler un grand nombre de valeurs qu'on considère ponctuelles. Ces valeurs sont ensuite transformées par différentes techniques pour obtenir des valeurs de bloc (Renard et al., 1997; Desbarats, 1992). Un des aspects de la méthode dont il a peu été question consiste à savoir si le variogramme utilisé pour simuler les valeurs ponctuelles est adéquat. Le choix d'un variogramme ponctuel pour la conductivité hydraulique repose d'avantage sur une décision que sur des faits puisque la conductivité hydraulique est une notion qui implique nécessairement un certain volume.

Dans le cas des essais effectués sur le site de Solbec et Cupra, deux variogrammes différents ont été obtenus pour des essais effectués dans le même milieu. Les essais simulés produiront vraisemblablement aussi des variogrammes différents mêmes s'ils auront été effectués à partir du même ensemble de valeurs ponctuelles. Une série de simulations est proposée en considérant chacun des variogrammes. Le but est de vérifier à quel point le choix d'un type d'essai affecte la conductivité hydraulique équivalente d'un calcul de changement d'échelle. Les valeurs de conductivité hydraulique simulées seront soumises à un simulateur d'écoulement de manière à obtenir

une conductivité hydraulique équivalente. La méthode de renormalisation simplifiée sera aussi utilisée afin d'en comparer les résultats avec ceux de la méthode numérique.

### 3.2.1 Simulation du champ de valeurs ponctuelles

Les variogrammes qui seront obtenus correspondent à un milieu stratifié en trois dimensions. Ils seront utilisés ici pour simuler un milieu isotrope à deux dimensions ce qui peut sembler être une incohérence. Le but du présent exercice ne consiste en fait qu'à étudier les conséquences du choix du variogramme ponctuel sur les résultats d'un calcul de changement d'échelle typique.

Les données sont simulées sur une grille à deux dimensions de 64 x 64. Le pas de la grille est fixé à 25 cm. Le support considéré comme ponctuel a donc ici en réalité une taille de 0,625 m<sup>2</sup>. La taille des blocs sur lesquels la conductivité équivalente sera calculée est par conséquent de 16 m x 16 m.

Le nombre de valeurs à simuler pour chaque réalisation s'élève à plus de 4000. La technique de simulation LU s'avère alors peu adéquate pour un micro-ordinateur. La technique de simulation séquentielle gaussienne a été utilisée en raison de la possibilité de simuler un grand nombre de données. Le programme SGSIM de la bibliothèque de programmes GSLIB a été utilisé à cette fin. Un exemple du fichier de paramètres utilisé est présenté en annexe. Le modèle ajusté sur les résultats du PERMAC était de type exponentiel avec une portée de  $a=1.4$  m, un effet pépité  $C_0=0.04$  et une partie structurée  $C=0.25$ . Le modèle du bout de tubage était aussi de type exponentiel avec un effet pépité  $C_0=0.1$ , une portée  $a=1.6$  m et une partie structurée  $C=0.29$ .

Quarante-huit champs de conductivité hydraulique seront simulés pour chacun des deux variogrammes dits ponctuels. Durant les simulations, les valeurs du logarithme de  $K$  seront tirées d'une distribution normale ( $N_{0,1}$ ). Les valeurs simulées seront ensuite décalées de 6 ordres de grandeur pour obtenir une moyenne logarithmique de  $1 \times 10^{-6}$  m/s. Les simulations des deux variogrammes sont effectuées en utilisant la même racine de générateur de nombres aléatoires ce qui signifie que les mêmes nombres sont tirés dans le même ordre. Les champs de conductivité hydraulique qui en découlent auront donc sensiblement la même forme ce qui en permettra la comparaison.

### **3.2.2 Conductivité hydraulique équivalente**

#### **3.2.2.1 Méthode des différences finies**

Les champs de conductivité hydraulique simulés sont soumis à un simulateur d'écoulement par différences finies. Le choix du logiciel s'est arrêté sur MODFLOW en raison de sa grande diffusion et de la facilité avec laquelle il est possible de générer rapidement un grand nombre de fichiers de paramètres. La conductivité équivalente est déduite du flux total traversant le modèle.

Le modèle est de type perméamètre et comporte autant d'éléments que le nombre de valeurs de conductivité hydraulique des simulations soit  $64 \times 64$ . Deux des extrémités opposées du modèle ont des conditions de charge constantes qui créent un gradient hydraulique uniforme. Les deux autres côtés ont des conditions de débit nul. La conductivité hydraulique équivalente s'obtient par la relation ( 2.7 ) et nécessite l'établissement d'un facteur géométrique propre au modèle. Le facteur géométrique peut être déterminé de manière analytique ou de manière numérique avec une conductivité

hydraulique constante. Un test a été effectué avec plusieurs valeurs de conductivité hydraulique. Les résultats sont donnés au Tableau 3-1.

Tableau 3-1 Validation des résultats de Modflow

Essai	K (m/s)	Q (m³/s)	ci (m)
1	1.00 <sup>E</sup> -03	0.002038	2.038
2	5.00 <sup>E</sup> -04	0.001019	2.038
3	1.00 <sup>E</sup> -04	0.000203	2.038
4	5.00 <sup>E</sup> -05	0.0001019	2.038
5	1.00 <sup>E</sup> -05	2.038E-05	2.038
6	5.00 <sup>E</sup> -06	1.019E-05	2.038
7	1.00 <sup>E</sup> -06	2.038E-06	2.038
8	5.00 <sup>E</sup> -07	1.019E-06	2.038
9	1.00 <sup>E</sup> -07	2.038E-07	2.038

Le facteur géométrique combiné au gradient hydraulique s'est avéré identique pour chacun des essais avec  $ci = 2.038$ , ce qui correspond au facteur géométrique analytique. La perte de charge sur l'ensemble du modèle est de 2.0m. La distance L centrée sur les éléments est de 15.75 m, ce qui donne un gradient  $i = \frac{\Delta H}{L} = 0.127$ . La section 2D du modèle est de  $c = 16$  m. Le produit ci est donc bien de 2.03m.

### 3.2.2.2 Méthode de renormalisation

La méthode de renormalisation simplifiée décrite à la section 2.2.1.6 a également été utilisée pour calculer les conductivités hydrauliques équivalentes des 96 ensembles de données simulées. Aucune anisotropie n'ayant été



considérée dans cette partie de l'étude, la relation ( 2.15 ) peut être utilisée pour le calcul de la valeur finale:

$$K_{er} = \sqrt{K_{min} K_{max}}$$

La routine utilisée pour le calcul de renormalisation apparaît en annexe.

## CHAPITRE IV

### RÉSULTATS

Des valeurs de conductivité hydraulique équivalente ont été obtenues pour chacune des simulations d'essais en place effectuées à intervalles de profondeur réguliers. Les résultats sont analysés par le biais de variogrammes et de diagrammes de dispersion. Les résultats des opérations de changement d'échelle sont aussi présentés.

#### 4.1 Structure spatiale

La Figure 4.1 montre les variogrammes des résultats pour les simulations sans effet pépite. Les variogrammes des valeurs simulées et le modèle dont elles sont issues sont aussi montrés pour fins de comparaison.

Le plateau du variogramme des résultats des essais numériques est légèrement plus bas que celui des valeurs de  $K$  simulées. La diminution de la hauteur du plateau est plus importante dans le cas du PERMAC que dans le cas du bout de tubage. Les portées demeurent à peu près inchangées et l'effet pépite demeure inexistant.

La série d'essais 1.2 a causé une très faible modification du variogramme ponctuel (figure 4.1b). L'effet est plus marqué dans le cas des simulations 1.1, 1.3 et 1.4 (figures 4.1a, 4.1c et 4.1d).

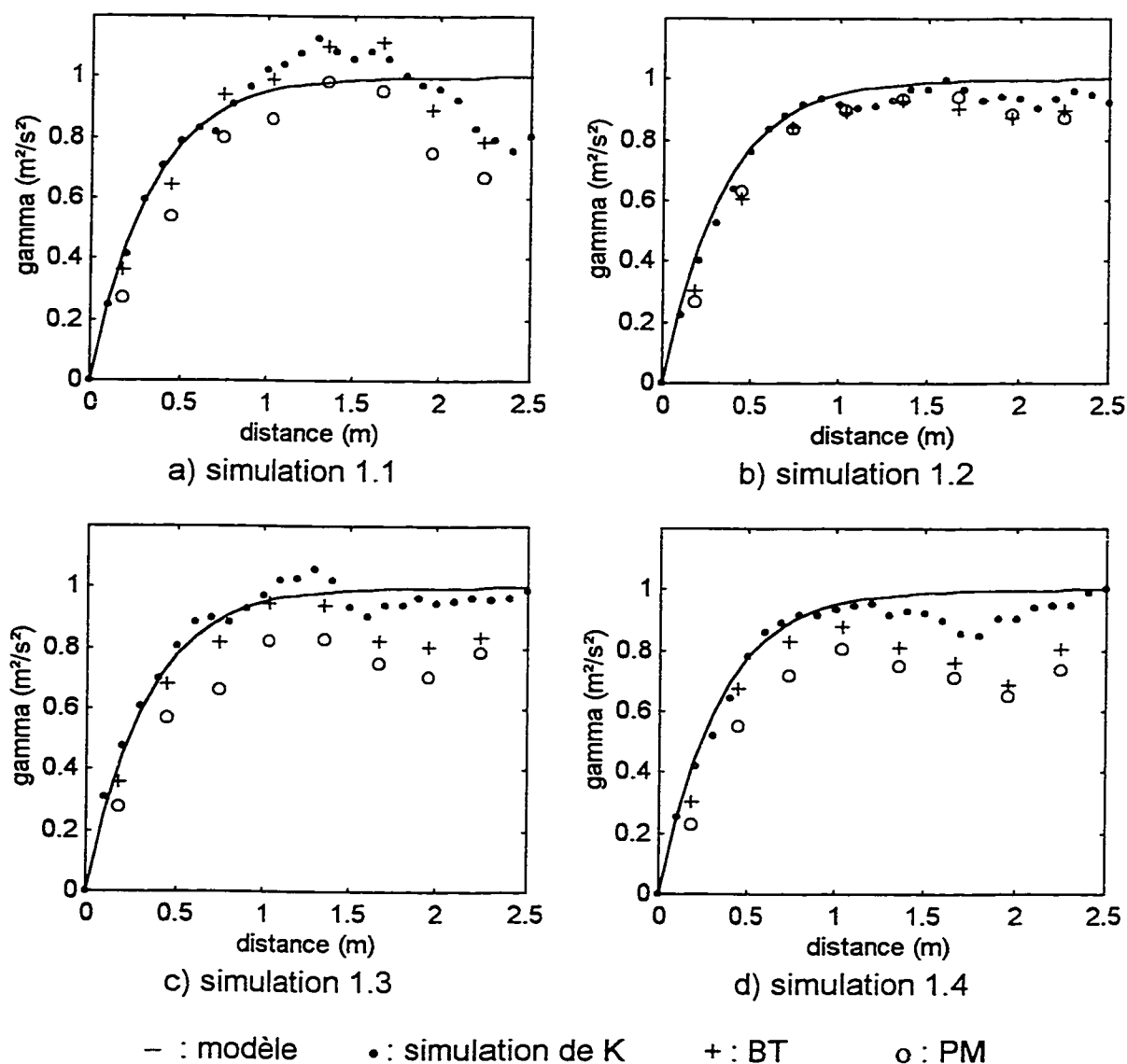


Figure 4.1 Variogrammes du logarithme en base 10 de K résultant de la modélisation d'essais sans effet pépite

La Figure 4.2 montre les variogrammes des résultats avec effet pépite. Le modèle utilisé pour les simulations ponctuelles de K ainsi que les modèles des résultats in situ du site de Solbec et Cupra ont été superposés afin de visualiser l'importance des changements de structure spatiale induits par les essais numériques.

L'effet de diminution de la hauteur du plateau est beaucoup plus marqué que dans le cas des simulations sans effet pépité. Pour les 12 simulations, le plateau du variogramme du PERMAC est plus bas que celui du bout de tubage. Il ne semble pas y avoir de modification significative de la portée des résultats par rapport à la portée du modèle de variogramme. Par contre, dans tous les cas, le plateau des résultats est nettement plus bas que celui du modèle initial. L'importance de l'effet pépité est grandement altéré par les essais de perméabilité. Cette atténuation de l'effet pépité est responsable en grande partie de la diminution du plateau.

Dans l'ensemble, les résultats ne semblent pas reproduire fidèlement les variogrammes des valeurs de  $K$  mesurées sur le site de Solbec et Cupra. Une attention particulière peut être portée sur les simulations 2.3 et 2.4 qui donnent des résultats assez semblables aux essais in situ. La Figure 4.3 montre plus en détail les variogrammes des résultats de ces deux séries d'essais comparés aux modèles ajustés sur les variogrammes des données réelles.

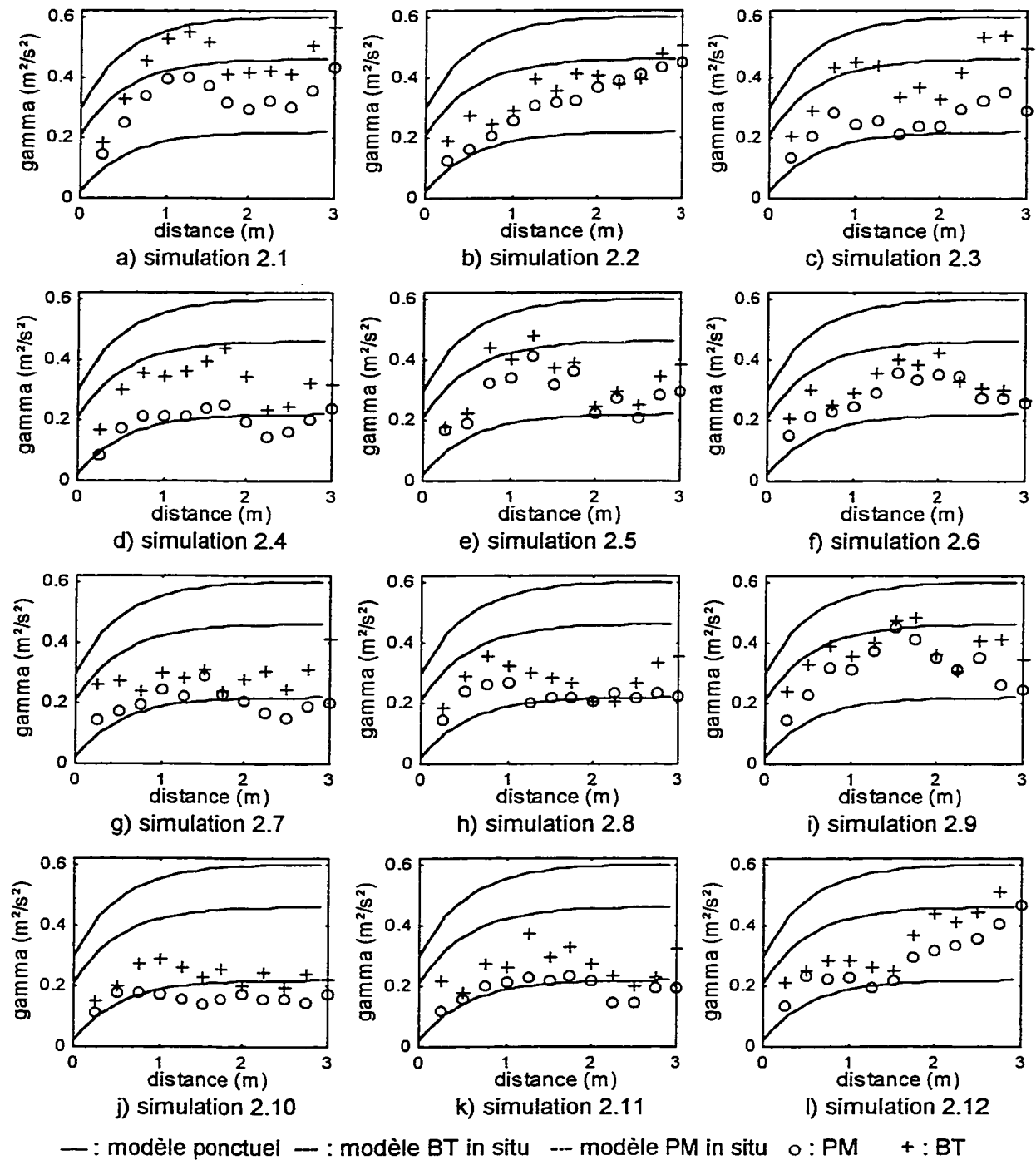
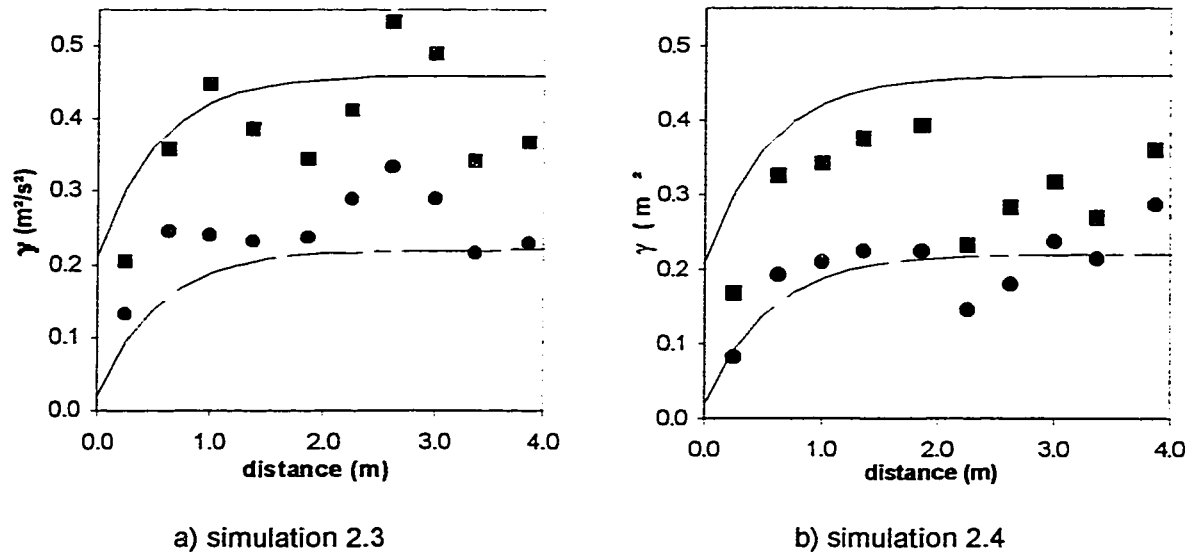


Figure 4.2 Variogrammes de la conductivité hydraulique équivalente obtenue par modélisation numérique d'essais de perméabilité pour les simulation avec effet pépite ( $\log_{10} K_e$ )



Légende:

- Modèle des essais en bout de tubage (Morin 1992)
- Modèle des essais au PERMAC (Morin 1992)
- Variogramme des résultats numériques du bout de tubage
- Variogramme des résultats numériques du PERMAC

Figure 4.3 Détail des variogrammes des résultats d'essais numériques pour les simulations avec effet pépite 2.3 et 2.4 et des modèles de variogrammes des essais in situ ( $\log_{10} K$ ).

La Figure 4.4 montre le variogramme des résultats avec effet pépite dans leur ensemble ainsi que les modèles de variogramme des données du site de Solbec et Cupra. Les valeurs provenant des différentes simulations ont été combinées. Elles ont toutefois été séparées d'une distance suffisante pour qu'aucune paire provenant de deux simulations différentes ne soit prise en considération dans le calcul des variogrammes.

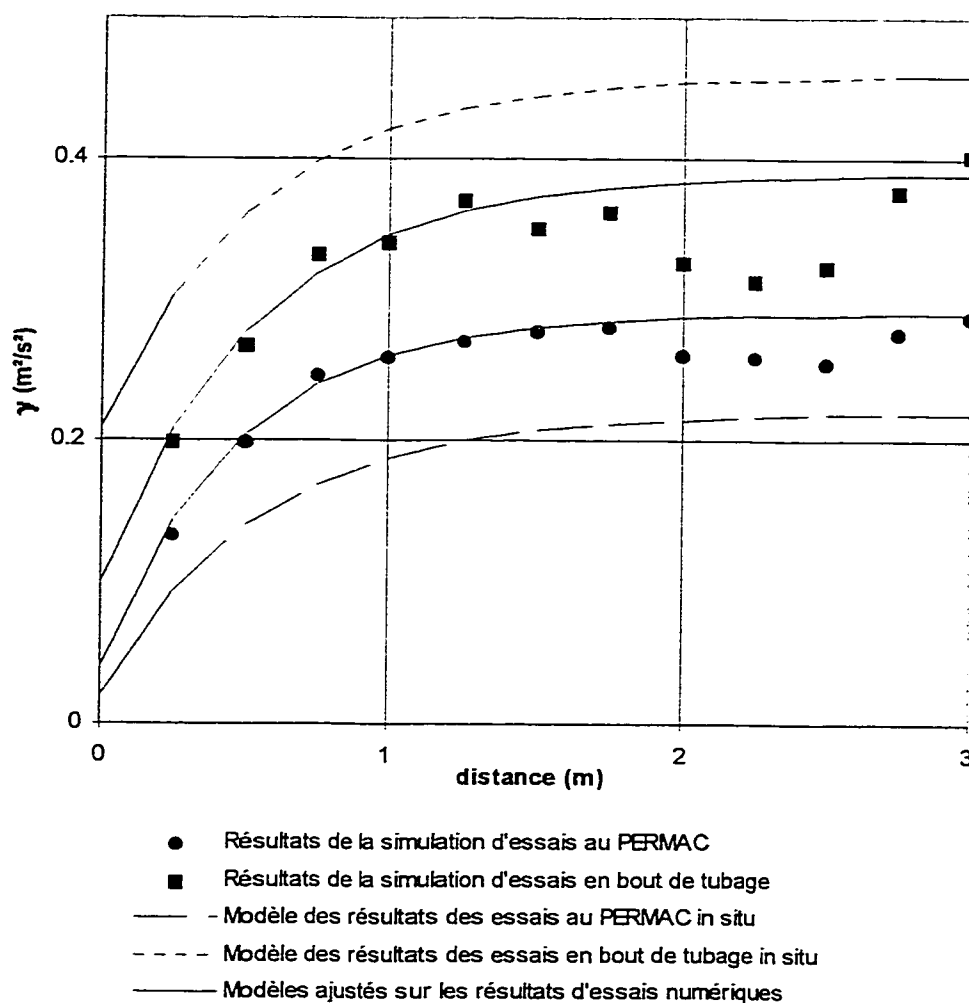


Figure 4.4 Comparaison des variogrammes du  $\log_{10}(K)$  de l'ensemble des simulations numériques et des modèles de variogrammes des essais en place effectués sur le site de Solbec et Cupra (Morin 1992)

Les variogrammes des essais numériques se situent à l'intérieur d'une plage formée par les modèles des résultats du site de Solbec et Cupra. Le variogramme des essais numériques en bout de tubage est plus bas que celui des données réelles. Le variogramme des essais numériques du PERMAC est quant à lui plus haut que le variogramme des données mesurées sur le terrain.

Il en va de même pour les effets pépité respectifs. Par contre, les portées sont demeurées sensiblement les mêmes. La Figure 4.4 montre aussi les modèles ajustés sur les points des variogrammes des résultats. Les deux modèles sont des exponentiels (équation 2.22) dont les caractéristiques sont présentées au Tableau 4-1:

Tableau 4-1 Modèles de variogramme des résultats

	PERMAC	Bout de tubage
Effet pépité ( $C_0$ )	0.04	0.1
C	0.25	0.29
Portée ( $a$ )	1.4	1.6

Dans ce tableau, l'effet pépité représente la variance des résultats à très petite échelle. Cet effet pépité ne comportent pas d'erreur de mesure puisque les valeurs ont été simulées et non mesurées. L'effet pépité est plus important dans le cas du bout de tubage que dans celui du PERMAC. L'effet pépité des valeurs de conductivité hydraulique ponctuelles était de  $C_0 = 0.3$ . Le rapport entre l'effet pépité ponctuel et celui du PERMAC est de 7.5. Dans le cas du bout de tubage, ce rapport est de 3. La partie structurée du variogramme ( C ) décrit les fluctuations de la conductivité hydraulique dans l'espace jusqu'à une distance équivalant à la portée  $a$ . Les parties structurées des variogrammes du PERMAC, du bout de tubage et des valeurs de conductivité hydraulique simulées sont pratiquement identiques.

## 4.2 Comparaison du résultat des deux modèles

La Figure 4.5 montre le diagramme de dispersion entre le logarithme des moyennes géométriques des valeurs de conductivité hydraulique obtenues



avec le modèle du bout de tubage et celles obtenues avec le modèle du PERMAC pour chacune des simulations sans effet pépité.

Les moyennes de  $\log_{10}(K)$  des résultats des essais varient entre -6.1 et -5.7. Les résultats du PERMAC sont systématiquement plus élevés que ceux du bout de tubage comme en témoigne le fait que tous les points se situent au-dessus de la ligne médiane.

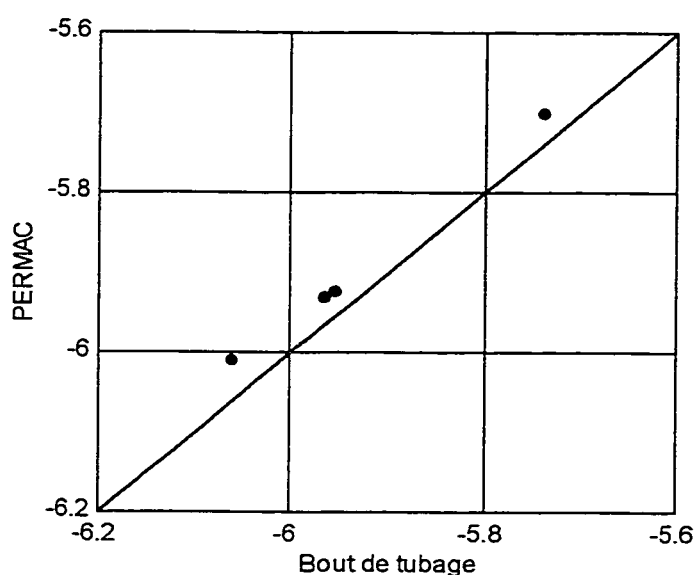


Figure 4.5 Diagramme de dispersion des moyennes géométriques ( $\log K_g$ ) sur 150 résultats d'essais de perméabilité numérique pour les 4 simulations de valeurs sans effet pépité

La figure 4.6 montre le diagramme de dispersion du logarithme de la moyenne géométrique des résultats des essais avec effet pépité. Les moyennes des essais sont en général plus élevées que l'espérance des valeurs simulées dans le cas du modèle du PERMAC. Le biais induit par le modèle du bout de tubage est moins important puisque les valeurs de ce dernier sont réparties de part et d'autre de l'espérance des valeurs simulées qui avait été fixée à  $\log_{10}(K) = -6$ .

Comme c'était le cas avec les simulations sans effet pépite, la moyenne des résultats du PERMAC est nettement plus élevée que celle du bout de tubage.

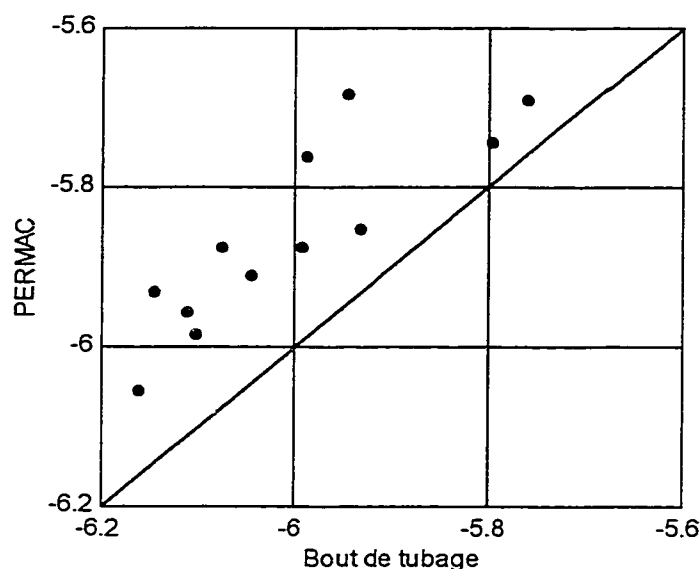


Figure 4.6 Diagramme de dispersion des moyennes géométriques ( $\log K_g$ ) sur 32 essais de perméabilité numériques pour les 12 simulations de valeurs ponctuelles avec effet pépite

### 4.3 Comparaison des valeurs ponctuelles et des résultats d'essais numériques

Les résultats d'essais simulés par le modèle du bout de tubage sont influencés en grande partie par la valeur de conductivité hydraulique de la strate dans laquelle se trouve la zone d'injection. C'est ce qui ressort de la figure 4.7 qui montre les régressions linéaires des résultats des simulations d'écoulement ( $K_e$ ) en fonction des valeurs ponctuelles des strates où se trouve la zone d'injection ( $K_{sim}$ ) pour les 12 simulations des essais en bout de tubage avec effet pépite.

La pente des droites de régression varie de 0.83 à 0.67. Les coefficients de corrélation fluctuent entre 0.93 et 0.97 ce qui signifie que la valeur de conductivité hydraulique de la strate en contact direct avec la zone d'injection explique le résultat des essais dans des proportions équivalentes.

La figure 4.8 fait le même type de comparaison mais pour l'ensemble des simulations d'essais en bout de tubage . La pente de la droite de régression est de 0.75 et le coefficient de corrélation est de 0.95. On observe que la dispersion des valeurs de strates est plus grande que celle des valeurs des essais. Les strates adjacentes supérieures et inférieure influent donc dans une certaine proportion sur les résultats des essais. L'essai effectue une moyenne mobile pondérée sur les strates en contact direct et à proximité de la zone d'injection.

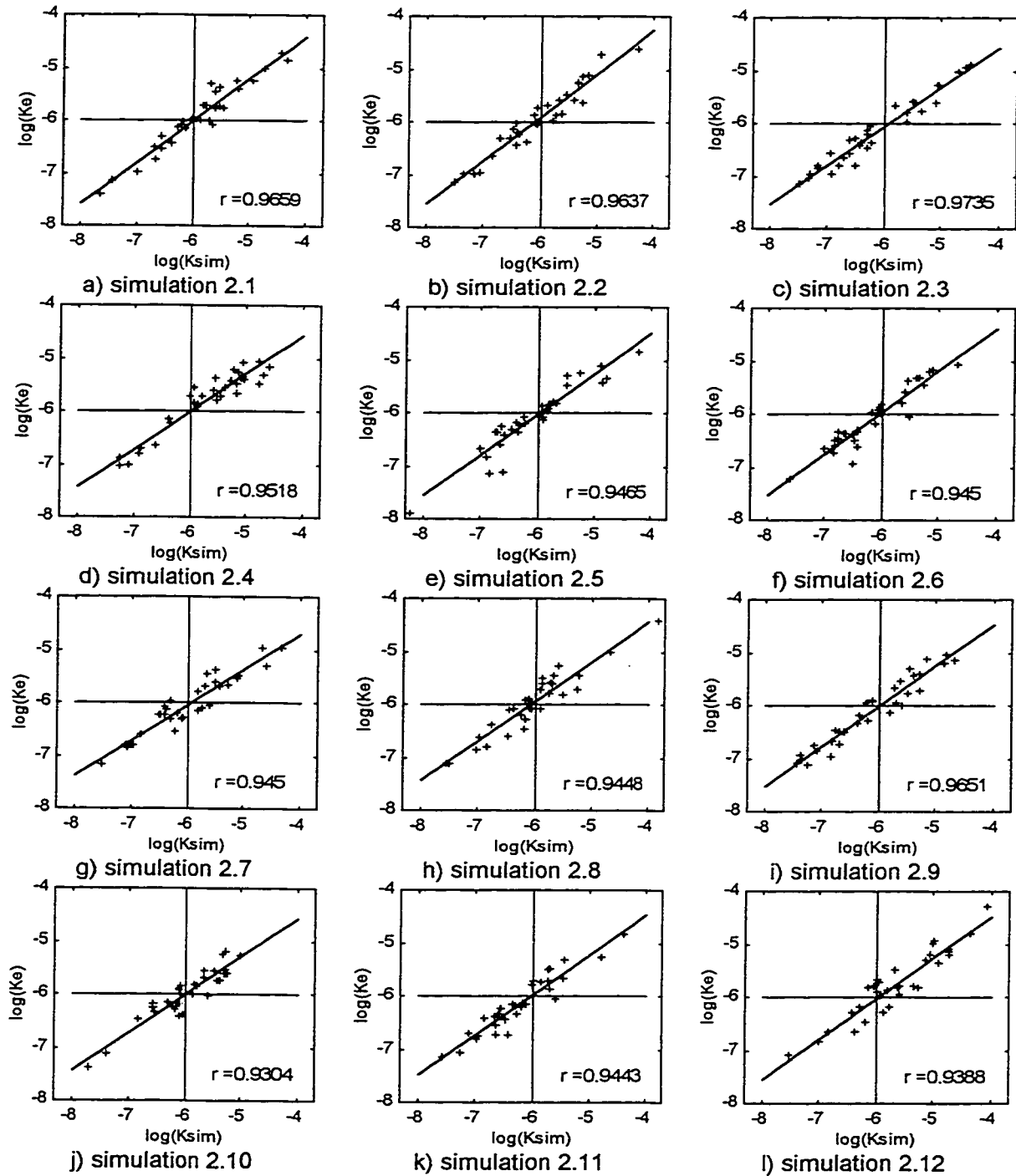


Figure 4.7 Régression linéaire du résultat des essais en bout de tubage  $K_e$  en fonction de la conductivité hydraulique ponctuelle des strates en contact avec la zone d'injection  $K_{sim}$ .

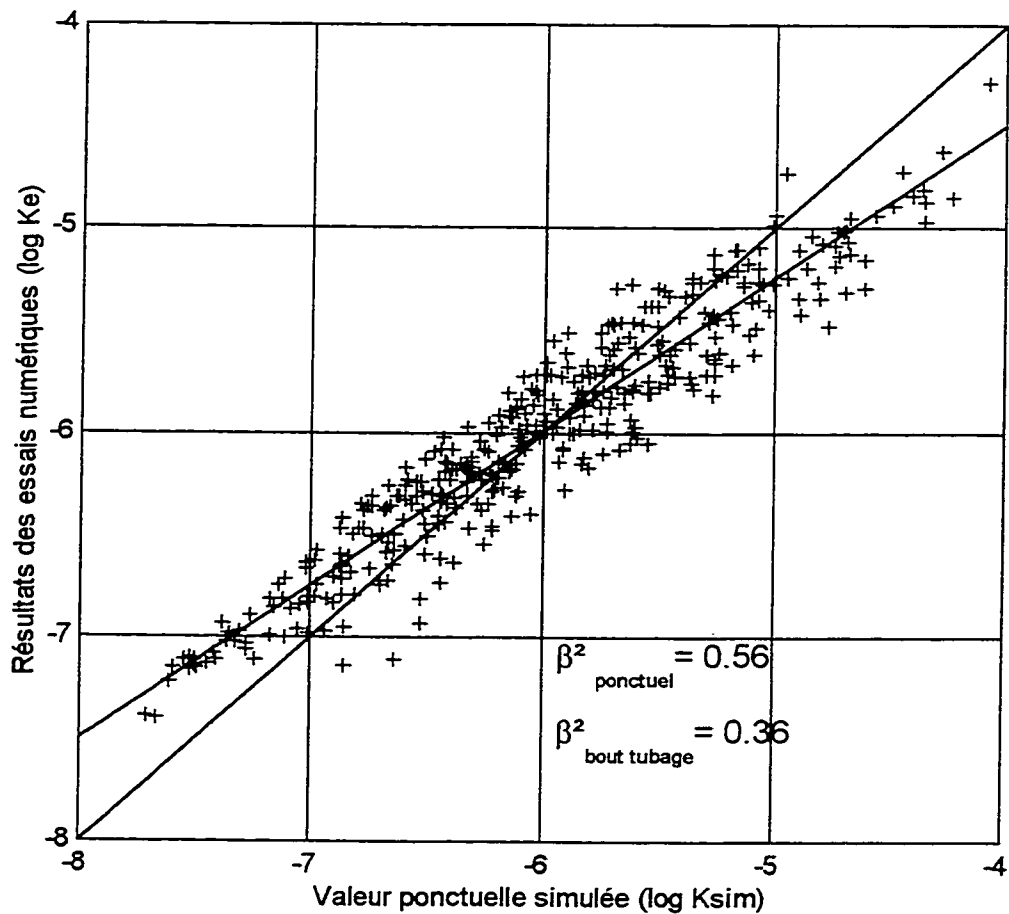


Figure 4.8 Régression linéaire des résultats des essais numériques en bout de tubage ( $K_e$ ) en fonction de la conductivité hydraulique des strates en contact avec la zone d'injection ( $K_{\text{sim}}$ ) pour l'ensemble des résultats

Les résultats des essais effectués à l'aide du modèle du PERMAC sont comparés à la moyenne arithmétique des 4 strates en contact avec la zone d'injection pour chacune des simulations. Les régressions linéaires pour les 12 simulations apparaissent à la figure 4.9.

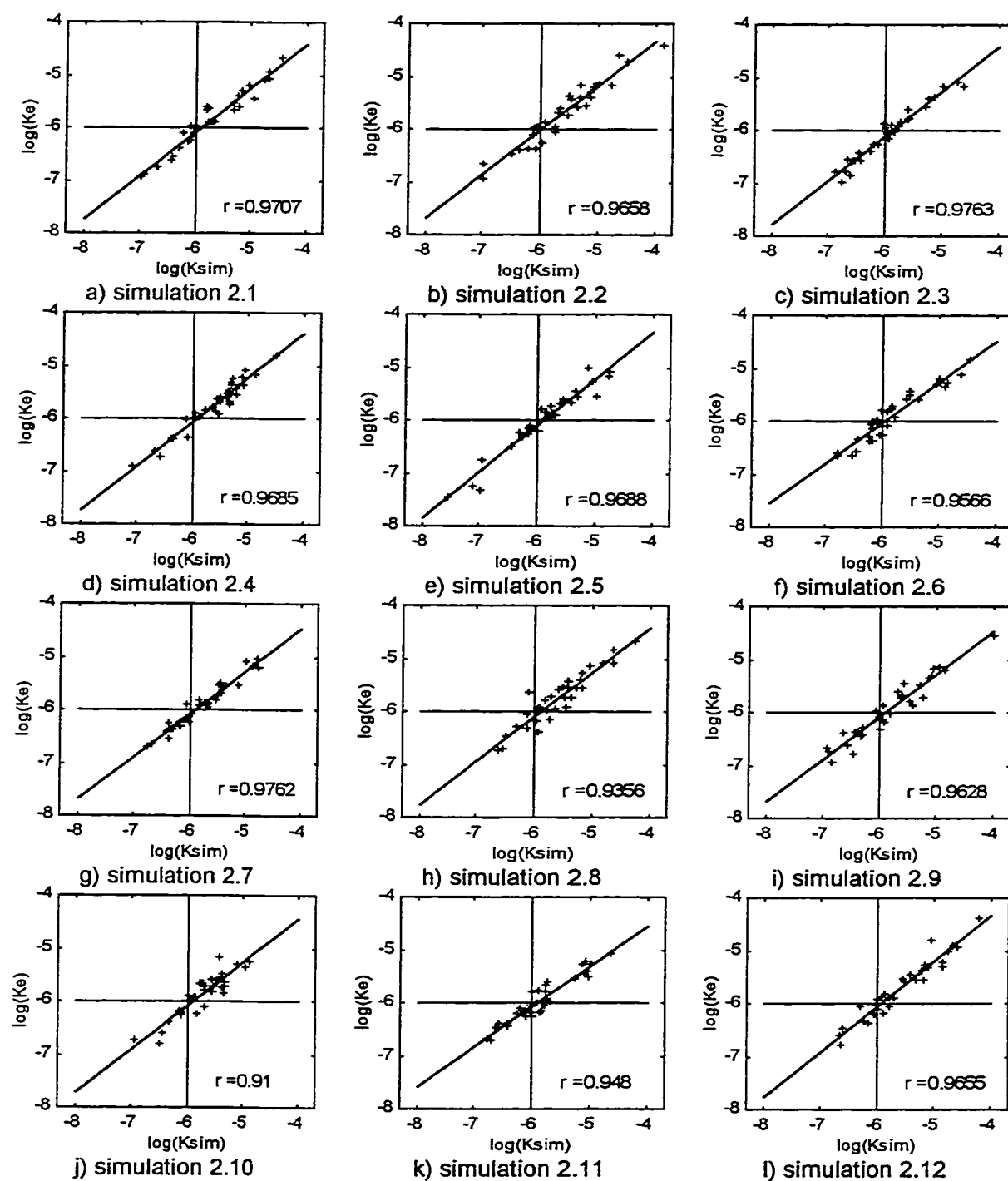


Figure 4.9 Régression linéaire du résultat des essais au PERMAC ( $K_e$ ) en fonction de la moyenne arithmétique de la conductivité hydraulique des strates en contact avec la zone d'injection ( $K_{sim}$ )

Comme dans le cas des essais en bout de tubage, la corrélation entre les valeurs des strates et le résultat des simulations est forte, variant de 0.91 à 0.98. La pente des droites de régression fluctue entre 0.76 et 0.88.

La figure 4.10 montre les résultats de l'ensemble des simulations d'écoulement effectuées à l'aide du modèle du PERMAC. Le coefficient de corrélation entre les moyennes arithmétiques de 4 strates et les résultats des simulations est de 0.96. La pente de la droite de régression est plus forte que dans le cas du bout de tubage avec  $m = 0.83$ .

La droite de régression intercepte la ligne  $K_e = K_{sim}$  à proximité du point (-6,-6) ce qui indique que les valeurs extrêmes ont tendance à être atténuées par les simulations. Les résultats des essais de perméabilité sont moins dispersés que les valeurs moyennes de conductivité hydraulique des quatre strates juxtaposées à la zone d'injection. Comme dans le cas du bout du tubage, l'essai au PERMAC effectue une moyenne pondérée des valeurs de strates en contact direct et à proximité de la zone d'injection.

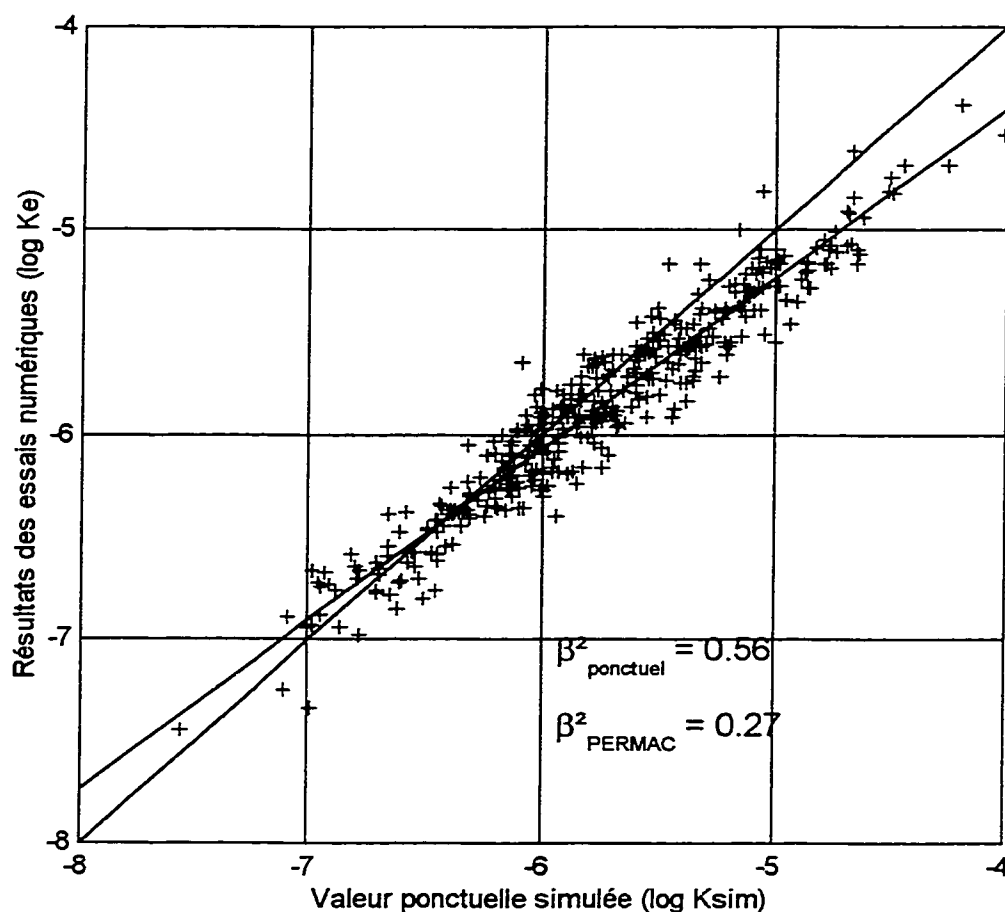


Figure 4.10 Régression linéaire entre la moyenne arithmétique des valeurs des strates en contact avec la zone d'injection ( $K_{\text{sim}}$ ) et le résultat des essais ( $K_e$ ) pour l'ensemble des résultats des simulations d'essais au PERMAC

La moyenne fixée lors des simulations était de  $K=1 \times 10^{-6}$  m/s. Toutefois, d'une simulation à l'autre, la moyenne des valeurs simulées peut varier légèrement. La comparaison des moyennes des résultats des essais et des moyennes des valeurs simulées montre que le PERMAC donne des résultats systématiquement plus élevés que la moyenne des valeurs ponctuelles. Les essais en bout de tubage donnent des résultats qui semblent moins biaisés. Ce



fait est illustré à la figure 4.11 qui montre les moyennes des valeurs simulées comparées aux moyennes des résultats des essais.. Chaque point représente la moyenne de 32 résultats d'essais comparés à la moyenne de 1000 valeurs simulées.

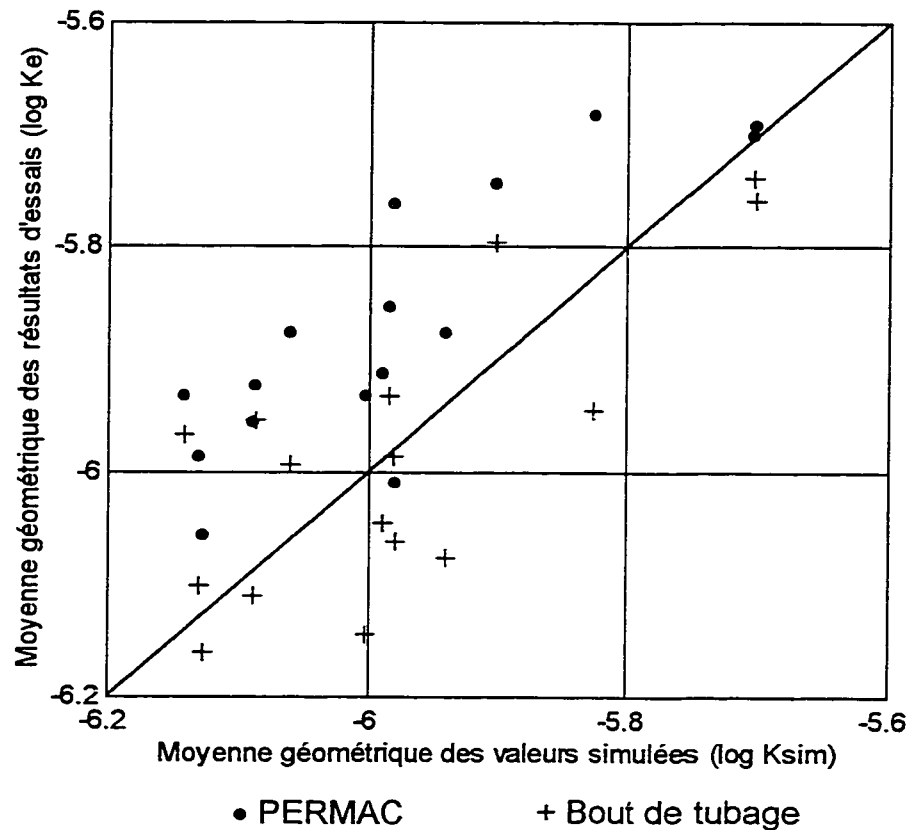


Figure 4.11 Moyennes comparées des 1000 valeurs ponctuelles simulées et de la réponse des 32 essais numériques au PERMAC et en bout de tubage pour les 12 simulations avec effet pépite et les 4 simulations sans effet pépite.

## 4.4 Anisotropie

En posant l'hypothèse que les résultats du PERMAC représentent surtout la conductivité hydraulique horizontale et que l'essai en bout de tubage donne principalement une conductivité hydraulique verticale, l'anisotropie à petite échelle peut être donnée par le rapport entre les mesures des deux types d'essais à la même profondeur. Ce rapport  $K_{pm}/K_{bt}$  pour l'ensemble des essais varie entre 0.55 et 13 avec une moyenne de 1.7.

L'anisotropie à la verticale d'un point du dépôt correspond au rapport entre la conductivité hydraulique horizontale ( $K_h$ ) et la conductivité hydraulique verticale ( $K_v$ ). Le dépôt simulé étant composé de strates continues, la solution analytique de l'anisotropie sur l'ensemble des strates simulées est fort simple puisque  $K_h$  est donné par la moyenne arithmétique et  $K_v$  par la moyenne harmonique des valeurs ponctuelles de conductivité hydraulique. Des essais numériques de type perméamètre avec un flux unidirectionnel et uniforme ont été effectués et confirment cette hypothèse. L'anisotropie  $\frac{K_h}{K_v}$  de l'ensemble du dépôt pour les 12 ensembles de 1000 valeurs simulées varie de 12 à 26. Les valeurs de  $K_h$ , de  $K_v$  et de l'anisotropie apparaissent au tableau 4-2.

Tableau 4-2 Anisotropies réelles et estimées

Sim	Moyennes sur l'ensemble des 1000 valeurs simulées (m/s)		Moyennes des 32 résultats des essais numériques (m/s)		Anisotropie		
	Moyenne harmonique $m_h$	Moyenne arithmétique $m_a$	Moyenne harmonique $m_a(BT)$	Moyenne arithmétique $m_h(PM)$	réelle $\frac{m_a}{m_h}$	estimation par l'ensemble des résultats $\frac{m_a(PM)}{m_h(BT)}$	estimation par les valeurs extrêmes des résultats krigés $\frac{\max(K_{PM}^*)}{\min(K_{BT}^*)}$
2.1	$2.76 \times 10^{-7}$	$4.28 \times 10^{-6}$	$3.96 \times 10^{-7}$	$2.99 \times 10^{-6}$	15	8	41
2.2	$3.04 \times 10^{-7}$	$7.52 \times 10^{-6}$	$4.47 \times 10^{-7}$	$4.92 \times 10^{-6}$	25	11	23
2.3	$2.09 \times 10^{-7}$	$3.39 \times 10^{-6}$	$3.06 \times 10^{-7}$	$1.67 \times 10^{-6}$	16	5	9
2.4	$3.11 \times 10^{-7}$	$4.9 \times 10^{-6}$	$5.64 \times 10^{-7}$	$2.96 \times 10^{-6}$	16	5	13
2.5	$1.14 \times 10^{-7}$	$3.0 \times 10^{-6}$	$2.14 \times 10^{-7}$	$2.01 \times 10^{-6}$	26	9	19
2.6	$3.06 \times 10^{-7}$	$3.9 \times 10^{-6}$	$4.22 \times 10^{-7}$	$2.47 \times 10^{-6}$	13	6	6
2.7	$2.68 \times 10^{-7}$	$3.4 \times 10^{-6}$	$4.40 \times 10^{-7}$	$2.04 \times 10^{-6}$	13	5	8
2.8	$2.38 \times 10^{-7}$	$4.7 \times 10^{-6}$	$4.55 \times 10^{-7}$	$3.28 \times 10^{-6}$	20	7	13
2.9	$1.85 \times 10^{-7}$	$4.1 \times 10^{-6}$	$3.20 \times 10^{-7}$	$2.70 \times 10^{-6}$	22	8	12
2.10	$2.81 \times 10^{-7}$	$3.8 \times 10^{-6}$	$4.59 \times 10^{-7}$	$1.92 \times 10^{-6}$	14	4	6
2.11	$2.46 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-6}$	$3.75 \times 10^{-7}$	$1.91 \times 10^{-6}$	12	5	7
2.12	$3.49 \times 10^{-7}$	$7.6 \times 10^{-6}$	$6.70 \times 10^{-7}$	$4.62 \times 10^{-6}$	22	7	11

Pour estimer l'anisotropie minimale de l'ensemble du dépôt, Morin (1992) propose de faire le rapport des valeurs krigées maximales du PERMAC et minimales du bout de tubage:

$$\text{anisotropie min} = \frac{\max(K_{PM}^*)}{\min(K_{BT}^*)} \quad (4.1)$$

où  $K_{PM}^*$  est l'estimation par krigeage des valeurs de conductivité hydraulique provenant des essais au PERMAC et  $K_{BT}^*$  est l'estimation par krigeage des

valeurs du bout de tubage. Cette approche a été à nouveau utilisée à titre de comparaison. Les valeurs des résultats ont été estimées par krigeage sur une grille identique à celle des résultats des essais mais légèrement décalée pour faire ressortir la régionale en annulant l'effet pépite. Le krigeage crée un lissage des valeurs dans une proportion équivalente à l'effet pépite du modèle de variogramme. Les modèles de variogrammes utilisés sont ceux des résultats du tableau 4-1, soit des exponentiels de portée 1.4 et 1.6 et de plateau 0.29 et 0.39 respectivement pour le PERMAC et le bout de tubage. Les résultats de cette approche donnent des anisotropies qui varient de 6 à 41 avec une moyenne de 14 (tableau 4-2). Ces résultats sont comparés à l'anisotropie globale du dépôt (figure 4.12). En faisant abstraction de la valeur marginale de la simulation 1, le coefficient de corrélation entre les valeurs d'anisotropie globale et l'estimation par krigeage est de 0.86. La pente de la droite de régression est de 0.89. La méthode sous-estime légèrement l'anisotropie globale.

La conductivité hydraulique horizontale peut être estimée par la moyenne arithmétique des valeurs obtenues à l'aide des simulations du PERMAC. Le fait que le PERMAC effectue déjà une moyenne des valeurs de strates justifie l'emploi des résultats du PERMAC pour le calcul de la conductivité hydraulique horizontale. La moyenne harmonique des valeurs obtenues à l'aide de la modélisation des essais en bout de tubage peut servir à estimer la conductivité hydraulique verticale car ces valeurs constituent une meilleure estimation des valeurs ponctuelles que celles du permac. Le tableau 4-2 donne les valeurs de  $K_h$  et  $K_v$  estimées à partir des essais et les anisotropies correspondantes qui varient de 4 à 11.

Les résultats d'anisotropie sont présentés sous forme graphique à la figure 4.12. La corrélation entre les anisotropies globales et estimées par les

moyennes des résultats d'essais est de 0.87. La pente de la droite de régression est de 0.36. L'anisotropie estimée à partir des résultats des essais est donc systématiquement sous estimée par un facteur de 3 environ.

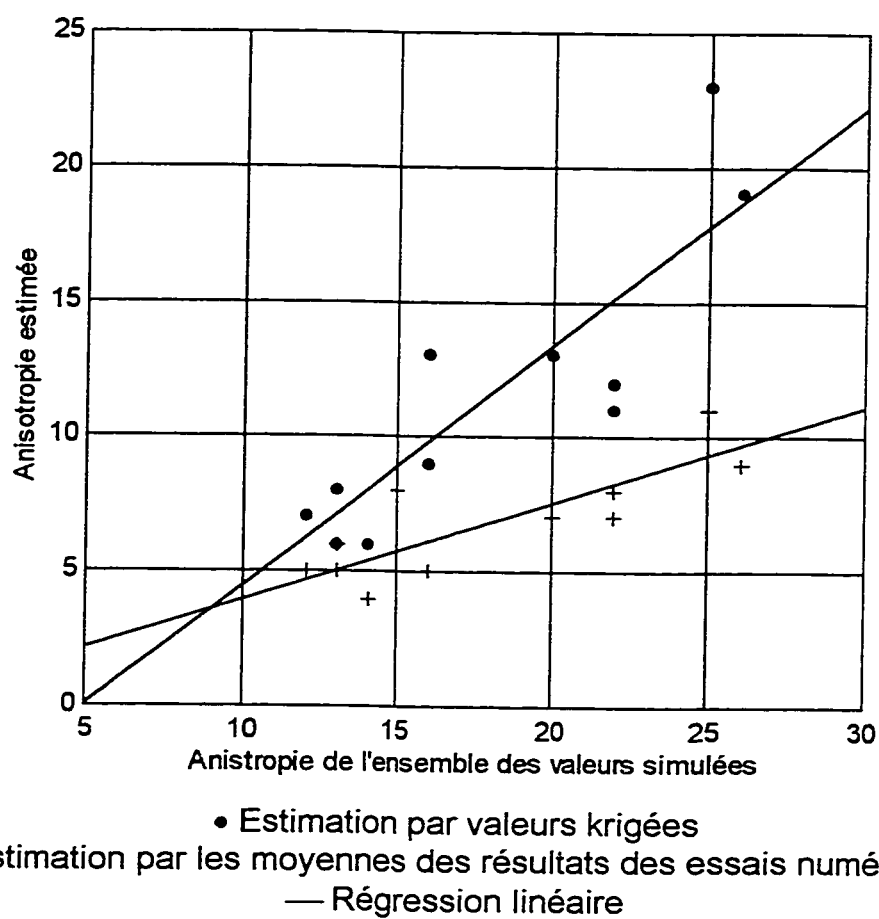


Figure 4.12 Comparaison des anisotropies estimées par deux méthodes et des anisotropies calculées sur l'ensemble des valeurs ponctuelles de strates simulées

## **4.5 Conductivité équivalente**

### **4.5.1 Conductivité équivalente par différences finies**

La moyenne du logarithme de l'ensemble des valeurs simulées par le variogramme du PERMAC est de -5.996 et la variance est de 0.29. La moyenne du logarithme de l'ensembles des valeurs simulées par le variogramme du bout de tubage est de -5.995 et la variance est de 0.39. Les variances correspondent aux plateaux de leurs variogrammes respectifs.

Les résultats de conductivité hydraulique équivalente obtenus par simulation d'écoulement en différences finies apparaissent à la figure 4.13. Les résultats de conductivité hydraulique équivalente obtenues à partir de la simulation du variogramme du PERMAC sont comparées à celles obtenues à partir du variogramme du bout de tubage. La conductivité hydraulique équivalente des données simulées à l'aide du variogramme du PERMAC semble toujours plus élevée que celle du bout de tubage correspondante. La différence entre les résultats des deux variogrammes tend à s'atténuer lorsque la conductivité hydraulique équivalente s'approche de la moyenne des valeurs simulées  $K = 1 \times 10^{-6}$  m/s. Les résultats du PERMAC sont aussi moins dispersés que ceux du bout de tubage.

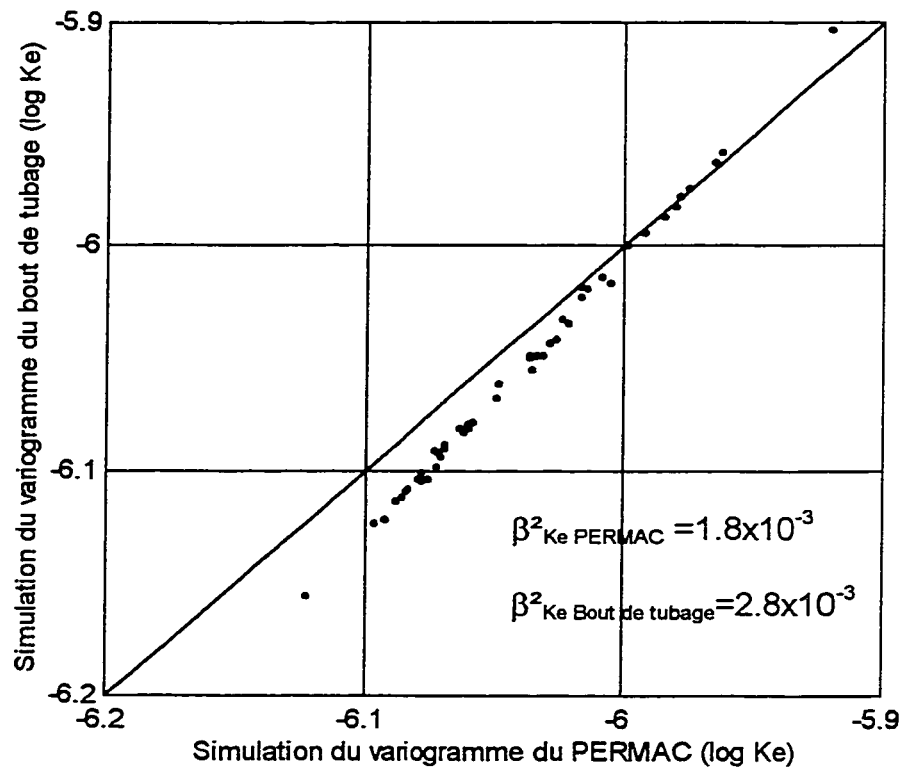


Figure 4.13 Diagramme de dispersion des résultats de la conductivité hydraulique équivalente obtenue par différences finies à partir des valeurs simulées à l'aide du modèle de variogramme du PERMAC et celui du bout de tubage

#### 4.5.2 Conductivité hydraulique équivalente par renormalisation

La comparaison des résultats de la renormalisation des valeurs simulées avec les deux variogrammes apparaît à la figure 4.14. La différence entre les résultats des deux variogrammes est moins flagrante cette fois. Les valeurs de conductivité hydraulique équivalente obtenues avec le variogramme du PERMAC sont légèrement moins dispersées que celles du bout de tubage puisque pour une simulation donnée, le résultat du PERMAC est plus près de

l'espérance des valeurs ponctuelles ( $1 \times 10^{-6}$  m/s) que le résultat du bout de tubage.

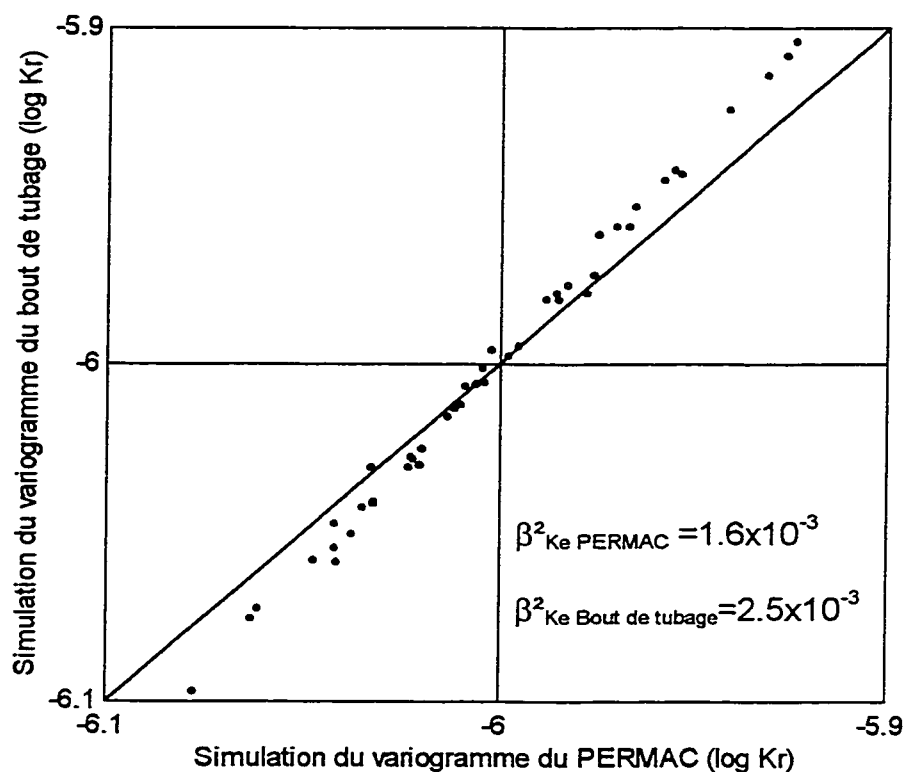


Figure 4.14 Diagramme de dispersion pour les conductivités hydrauliques équivalentes déterminées par renormalisation simplifiée ( $K_r$ ) des valeurs simulées à l'aide des modèles de variogrammes du PERMAC et du bout de tubage.

#### 4.5.3 Comparaison des deux méthodes de mise à l'échelle

La méthode de renormalisation simplifiée donne des valeurs de conductivité hydraulique supérieures à celles données par la méthode numérique par



différences finies. C'est ce qui ressort de la figure 4.15 qui compare les résultats obtenus par les deux méthodes pour toutes les simulations. Les résultats de la renormalisation semblent dispersés également de part et d'autre de l'espérance de  $K$  tandis que les résultats numériques sont en moyenne nettement inférieurs à l'espérance fixée.

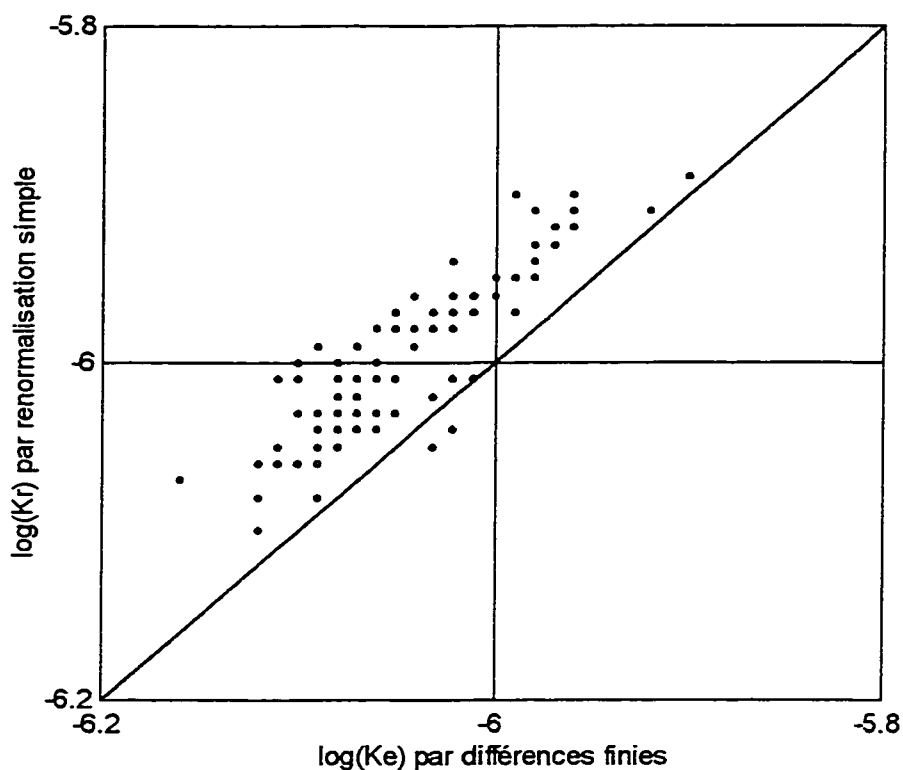


Figure 4.15 Comparaison des résultats de conductivité hydraulique équivalente obtenus par renormalisation ( $K_r$ ) et par différences finies ( $K_e$ )

La comparaison de la moyenne géométrique des valeurs simulées avec le résultat de la renormalisation apparaît à la figure 4.16. Contrairement à la méthode numérique, la renormalisation ne semble pas créer de décalage des valeurs par rapport à la moyenne géométrique des valeurs simulées.

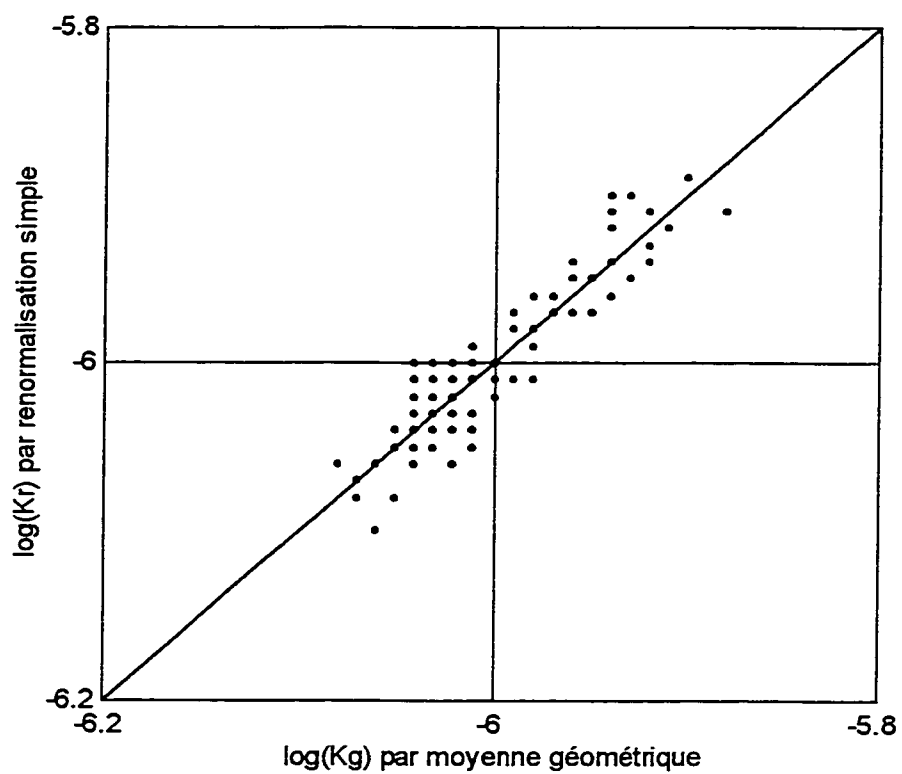


Figure 4.16 Diagramme de dispersion de la conductivité hydraulique équivalente calculée par renormalisation ( $K_r$ ) et de la moyenne géométrique des valeurs ponctuelles ( $K_g$ )

## CHAPITRE V

### DISCUSSION

#### 5.1 Reproduction des essais en place

Les essais numériques confirment que les différences entre les résultats des essais en bout de tubage et les essais au PERMAC sur le site de Solbec et Cupra sont dues en partie à l'effet d'échelle induit par la géométrie des appareils utilisés. Dans l'ensemble, la structure spatiale des essais en place n'est pas très bien reproduite. Toutefois, certaines simulations de valeurs ponctuelles ont donné des résultats se rapprochant des données de terrain. C'est le cas des simulations 2.3 et 2.4 dont les variogrammes sont très semblables aux variogrammes des valeurs réelles.

Les différences observées entre les résultats des essais en place et ceux des simulations peuvent s'expliquer par le choix des paramètres du modèle. Avec un modèle à strates plus fines, les résultats du PERMAC auraient été plus lissés car l'effet de moyenne mobile aurait été effectué sur un plus grand nombre de valeurs. Le plateau du variogramme du PERMAC aurait alors été plus bas, et donc plus près du variogramme des valeurs in situ. Pour obtenir un plateau plus élevé avec les essais numériques en bout de tubage, un variogramme ponctuel à plateau plus élevé aurait dû être utilisé. Les résultats des essais en bout de tubage étant en grande partie contrôlés par la strate au contact de la zone d'injection, la hauteur du plateau de leur variogramme en serait donc proportionnellement augmentée sans être trop affectée par la diminution de l'épaisseur des strates.

Ce sont les modèles ajustés sur les variogrammes expérimentaux du site de Solbec et Cupra qui ont servi de point de comparaison pour cette étude. Or ces variogrammes ont un effet pépité très prononcé. Une partie de cet effet pépité est attribuable à la variation de la conductivité hydraulique à petite échelle. L'autre partie, non quantifiable mais sans doute importante, est due aux erreurs expérimentales ainsi qu'au remaniement des matériaux durant le forage. Le variogramme ponctuel déduit à l'aide des deux variogrammes expérimentaux tient compte de ces erreurs. Ainsi, les valeurs simulées pour le modèle numérique sont bruitées de manière proportionnelle aux erreurs expérimentales. Pour effectuer une simulation stochastique des valeurs de conductivité hydrauliques représentant bien la réalité, il faudrait être en mesure de quantifier la portion de l'effet pépité qui est produite par l'erreur expérimentale et ne pas en tenir compte. Il est à noter que l'effet pépité dans le cas du PERMAC est très faible car le type de zone d'injection effectue un genre de moyenne mobile sur les données ponctuelles. Ce type d'appareil enrayer la structure spatiale à petite échelle causée par les matériaux testés. L'erreur expérimentale du variogramme du PERMAC est donc vraisemblablement responsable en très grande partie de l'effet pépité de ce variogramme.

L'effet de l'épaisseur des strates n'est pas pris en considération dans les simulations. Mentionnons simplement que la présence de strates plus épaisses devrait provoquer une plus grande continuité des variogrammes à l'origine. L'épaisseur des strates a un effet important sur le résultat d'un essai de conductivité hydraulique. De plus, dans le cas des essais en bout de tubage, la position du tubage dans la strate a aussi une influence très importante. Ces deux paramètres n'ont pas été simulés dans les essais numériques. Les variations que peuvent apporter ceux-ci sur le résultat des essais sont considérées comme étant pris en charge par l'effet pépité.

## 5.2 Effet de l'échelle des essais

Pour tous les champs de conductivité hydrauliques simulés dans cette étude, la moyenne du logarithme de la conductivité hydraulique des essais au PERMAC est plus élevée que celle du logarithme de la conductivité hydraulique des valeurs ponctuelles. Par contre, les essais en bout de tubage donnent des résultats pratiquement sans biais. Ce phénomène est dû à la taille des zones d'injection des essais. La taille de la zone d'injection du PERMAC est plus importante et on observe un effet de changement d'échelle. En général, plus le volume d'investigation est important, plus la conductivité hydraulique est élevée (Rovey et al., 1995). Cette explication est valable pour les changements d'échelle importants. C'est le cas dans l'estimation de la conductivité hydraulique régionale par exemple.

Une autre explication réside dans le fait que les moyennes qui apparaissent à la Figure 4.11 ainsi qu'aux Figures 4.5 et 4.6 sont les moyennes du logarithme de la conductivité hydraulique. On connaît la relation qui lie les moyennes d'une variable et de son logarithme pour le cas lognormal:

$$\mu = \log(m) - 0.5 \log\left(\frac{\sigma^2}{m^2} + 1\right) \quad (5.1)$$

où  $\mu$  est la moyenne du logarithme de la variable,  $m$  et  $\sigma^2$  sont la moyenne et la variance de la variable. On constate que plus la variance de la variable est élevée, plus la moyenne de son logarithme diminue. La variance des résultats du PERMAC est plus faible que celle du bout de tubage et des valeurs simulées. La variance globale correspond à la hauteur du plateau des variogrammes ( $C + C_0$ ) qui est de 0.6 dans le cas des valeurs ponctuelles, 0.39 dans le cas du bout de tubage et 0.29 pour le PERMAC.

### 5.3 Modification de la structure spatiale

Le fait que la hauteur du plateau des résultats des essais soit inférieure à celle des valeurs ponctuelles n'a rien de surprenant. En effet, l'essai de perméabilité en milieu finement stratifié agit comme une moyenne mobile pondérée des valeurs ponctuelles ce qui crée un lissage des données. La diminution de plateau est plus importante avec le PERMAC en raison de la taille de la zone d'injection. La moyenne est alors effectuée sur un plus grand volume.

La différence entre la structure spatiale des essais et celle des valeurs ponctuelles est faible dans le cas des simulations sans effet pépite. Avec une forte covariance des conductivités hydrauliques à faible distance, les variations de  $K$  entre une série de strates voisines sont faibles. L'effet de lissage des essais a alors peu d'impact. Les essais modifient donc très peu la partie structurée du variogramme ponctuel.

Dans le cas des essais avec effet pépite, les différences de structures spatiales sont beaucoup plus marquées. L'effet pépite, qui compte pour la moitié de la variance globale ( $C+C_0$ ) des valeurs ponctuelles, disparaît presque complètement avec les essais au PERMAC. Ce résultat est en accord avec les données du site de Solbec et Cupra où l'effet pépite des essais au PERMAC est très faible.

La comparaison de l'effet pépite des valeurs ponctuelles et de celui des résultats montre que le PERMAC effectue une moyenne mobile sur l'équivalent de 7,5 strates environ. En effet, l'effet pépite des valeurs ponctuelles est 7,5 fois supérieur à celui des résultats du PERMAC. Or la variance de la moyenne de  $n$  données non corrélées est donnée par:

$$var(\mu_x) = \frac{var(x)}{n} \quad (5.2)$$

où  $\mu_x$  est la moyenne de l'échantillon  $x$  et  $n$  est le nombre d'observations de  $x$ . À l'échelle des essais, la variance des strates est à peu près équivalente à l'effet pépité (absence de corrélation). Il en ressort que le nombre équivalent de strates entrant dans le résultat d'un essai au PERMAC est de 7,5. Le même exercice appliqué au bout de tubage indique que le bout de tubage effectue une moyenne sur l'équivalent de trois strates.

Ce résultat permet de formuler quelques hypothèses sur le variogramme ponctuel de la conductivité hydraulique sur le site de Solbec et Cupra. Rappelons que l'effet pépité des résultats du PERMAC in situ était de 0.02. L'effet pépité est provoqué en partie par la variation à petite échelle de la conductivité hydraulique du milieu. Une partie de cet effet pépité est aussi provoquée par les erreurs expérimentales. En négligeant l'erreur expérimentale, l'effet pépité du variogramme ponctuel devrait donc être au plus de 0.15, soit 7.5 fois l'effet pépité du PERMAC in situ. L'effet pépité du variogramme ponctuel utilisé pour les simulations était donc deux fois trop élevé puisqu'il avait été fixé à 0.3.

## 5.4 Représentativité des essais

Il existe une très forte corrélation entre les valeurs ponctuelles en contact avec la zone d'injection et les résultats des essais. Ce résultat provient du fait que le rayon d'influence des essais est très limité. Le résultat d'un essai en bout de tubage ne donnerait pratiquement d'information que sur la strate dans laquelle l'injection est effectuée. Pour le PERMAC, le volume d'investigation est

naturellement plus grand en raison encore une fois d'une zone d'injection plus large. Le rayon d'action très restreint des essais à charge variable comme ceux qui ont été effectués sur le site de Solbec et Cupra rend les résultats extrêmement sensibles au remaniement du sol lors du forage.

Pour les deux types d'essais, on observe un lissage vers l'espérance des valeurs ponctuelles. En effet, les conductivités hydrauliques qui résultent des essais ont tendance à être légèrement moins dispersées que les valeurs ponctuelles des strates en contact avec la zone d'injection. Ce phénomène est illustré par les figures 4.7 et 4.9 qui montrent que pour un essai donné, la valeur de conductivité hydraulique mesurée est généralement plus près de la moyenne des valeurs ( $1 \times 10^{-6}$  m/s) que la valeur de conductivité hydraulique de la strate correspondante.

Le lissage est plus fort dans le cas du bout de tubage que dans celui du PERMAC alors que l'effet de lissage du PERMAC devrait être plus important. Ceci est dû au fait que les valeurs comparées aux résultats du PERMAC sont moins dispersées que les valeurs comparées aux résultats du bout de tubage. Les valeurs comparées au PERMAC sont les moyennes des quatre valeurs ponctuelles en contact avec la zone d'injection et sont par le fait même lissées par rapport aux valeurs ponctuelles.

Les résultats des essais sont donc contrôlés en grande partie par les matériaux en contact immédiat avec la zone d'injection. L'influence des strates voisines de celles où sont effectués les essais est moindre mais crée néanmoins un lissage des résultats vers la valeur de l'espérance de la conductivité hydraulique.



## 5.5 Estimation de l'anisotropie

Les orientations des zones d'injection des deux appareils modélisés incitent à croire qu'il est possible d'estimer l'anisotropie du dépôt en comparant les résultats obtenus avec les deux types d'essais. Les résultats de la section 4.3 montrent que les résultats obtenus par les essais sont très influencés par les valeurs de conductivité hydraulique des strates en contact direct avec la zone d'injection. L'anisotropie mesurée avec les résultats des deux appareils à une même profondeur est donc une anisotropie à petite échelle qui ne tiendrait pas compte de la structure globale du dépôt. Aucune anisotropie de conductivité hydraulique n'a été considérée à l'intérieur même des éléments. L'anisotropie à petite échelle est très faible par rapport à l'anisotropie globale. L'anisotropie augmenterait donc graduellement avec la taille du volume considéré.

L'estimation de l'anisotropie à l'aide du rapport entre les moyennes harmoniques et arithmétiques des résultats des essais montre des différences importantes avec l'anisotropie globale du dépôt. En effet, les anisotropies estimées sont beaucoup plus faibles que les anisotropies calculées sur l'ensemble des valeurs ponctuelles. Les moyennes arithmétiques des résultats d'essais ne montrent pas d'écart majeur avec les moyennes ponctuelles. Par contre, les moyennes harmoniques des valeurs ponctuelles sont systématiquement plus faibles que celles des essais. L'anisotropie est par conséquent toujours sous estimée lorsqu'évaluée par les résultats des essais. La moyenne harmonique est en effet gouvernée par les plus faibles valeurs de conductivité hydraulique. Or la variance des valeurs ponctuelle est plus grande que celle des résultats d'essais ce qui entraîne une plus forte probabilité d'obtenir de faibles valeurs. On peut démontrer que l'espérance de l'anisotropie, exprimée par le rapport entre les moyennes arithmétiques et

harmoniques d'un ensemble de valeurs de conductivité hydraulique lognormales s'accroît lorsque la variance ponctuelle augmente (Marcotte, Chapuis, 1998).

L'approche proposée par Morin semble à première vue donner des résultats intéressants. Les valeurs d'anisotropie calculées sont très près de la valeur globale sauf pour une des simulations. Le principal problème vient précisément du fait qu'en prenant un rapport des valeurs maximales et minimales, tout résultat marginal influence le calcul d'anisotropie de manière exagérée. Le résultat peut devenir imprévisible. Cette approche ne peut donc pas être recommandée.

Une méthode d'estimation de l'anisotropie qui pourrait être satisfaisante consisterait à déterminer la structure spatiale ponctuelle des strates à partir des résultats d'essais en place. Le calcul d'anisotropie est très rapide si l'extension latérale des éléments du modèle régional correspond à l'extension présumée des strates. Il suffit alors de simuler un vecteur de valeurs de conductivité hydraulique ponctuelles pour chaque élément du modèle régional. Cette simulation est très rapide avec une méthode telle que la méthode LU. L'anisotropie pour chaque élément du modèle régional est alors obtenue par le rapport des moyennes harmoniques et arithmétiques des valeurs simulées.

## **5.6 Facteur géométrique**

La manière avec laquelle le facteur géométrique a été déterminé est la seule disponible. La solution analytique de la conductivité hydraulique en milieu stratifié pour un flux radial n'est pas connue. Le facteur géométrique doit tenir compte, dans le cas d'un modèle numérique, des conditions frontières. Une

solution analytique valable pour un milieu parfaitement stratifié de dimension infinie ne serait pas valable pour le modèle numérique qui possède toujours des dimensions finies.

Les résultats quant au rayon d'action des essais tendent à montrer que les facteurs géométriques utilisés sont peu représentatifs. En effet, en milieu homogène, la répartition des lignes d'écoulement se fait de manière uniforme. Ce n'est manifestement pas le cas en milieu stratifié. Les lignes d'écoulement deviennent rapidement horizontales avec la distance. Les facteurs géométriques calculés ne peuvent pas tenir compte de ce fait. Il est probable qu'une évaluation peu représentative du facteur géométrique soit en partie responsable de la mauvaise estimation de l'anisotropie.

## **5.7 Changement d'échelle**

Les valeurs résultant du changement d'échelle par différences finies semblent influencées par le choix du variogramme ponctuel. La variance globale des valeurs simulées avec le variogramme des essais en bout de tubage est plus élevée que celle des valeurs du PERMAC. Ceci explique pourquoi les résultats de conductivité hydraulique équivalente sont plus dispersées dans le premier cas que dans le second. Toutefois, les différences dues au changement de variogramme sont beaucoup moins importantes que les variations observées d'une simulation à l'autre pour un même variogramme. Il apparaît que le choix d'un variogramme le plus près possible de ce que pourrait être le variogramme ponctuel est préférable mais que ce choix n'entraîne pas de différences majeures dans le résultat global d'un calcul de changement d'échelle. La variation de conductivité hydraulique équivalente en fonction du variogramme

est perceptible malgré le fait que les variogrammes utilisés ont une faible portée (1.5 m) par rapport à la taille du champ simulé (16 m x 16 m).

La méthode de renormalisation a donné des résultats de conductivité équivalente toujours plus élevés que les différences finies. Les résultats du variogramme du PERMAC sont légèrement moins dispersés que ceux du bout de tubage en raison toujours d'une variance globale plus grande dans le cas du bout de tubage.

La différence dans les résultats obtenus par les deux méthodes de changement d'échelle durant cette étude ne présentent pas de différences majeures. Les différences observées sont minimales par rapport à la variance des résultats des simulations elles-mêmes. La méthode de renormalisation simplifiée peut par contre donner une conductivité hydraulique acceptable avec beaucoup moins d'efforts et de temps de calcul que la méthode des différences finies. Des résultats semblables avaient aussi été obtenus par Renard et al. (1996) en comparant les résultats de renormalisation et de différences finies.

Matheron (1967) a démontré que dans le cas d'un champ lognormal infini, la conductivité hydraulique équivalente est donnée par la moyenne géométrique indépendamment de la variance des valeurs. Les résultats obtenus ici tendent à montrer que les résultats de conductivité équivalente varient proportionnellement à la variance de dispersion des points, ce qui est en accord avec les résultats de Desbarats (1987). Cette différence vient du fait que les deux approches n'utilisent pas le même type de champ, l'un ayant des dimensions finies et l'autre des dimensions infinies.

## CONCLUSION

Cette étude avait quatre objectifs. Le premier consistait à expliquer les différences dans les résultats obtenus par les essais de perméabilité effectués à l'aide de deux types d'essais sur le site de Solbec et Cupra. Le second objectif était d'étudier la structure spatiale de deux types d'essais en réponse à une structure spatiale ponctuelle déterminée. Le troisième était de déterminer l'anisotropie de conductivité hydraulique du dépôt à l'aide des résultats d'essais de perméabilité. Finalement, l'impact du choix du variogramme ponctuel sur le résultat d'un calcul de conductivité hydraulique équivalente devait être analysé.

En faisant abstraction des erreurs expérimentales, les essais de perméabilité donnent une image lissée du milieu dans lequel ils sont effectués. Le variogramme des résultats des essais a toujours un plateau plus bas que celui des valeurs ponctuelles de strates ce qui implique que la variance des résultats est plus faible que la variance ponctuelle. La diminution de la variance des résultats est proportionnelle à la taille de la zone d'injection de l'appareil utilisé. Ainsi, le variogramme des résultats du PERMAC est plus bas que celui des résultats du bout de tubage. La modélisation d'un dépôt stratifié a permis de reproduire en partie les conditions qui ont donné les résultats obtenus sur le site de Solbec et Cupra par Morin (1992), Chapuis *et al.* (1992) et L'Écuyer *et al.* (1992). En posant l'hypothèse d'une stratification continue à l'échelle des essais, un variogramme ponctuel à l'échelle des strates peut être ajusté de manière à ce que les essais numériques donnent des réponses semblables aux essais sur le terrain.

L'estimation de l'anisotropie à partir des moyennes arithmétique et harmonique des résultats des essais est systématiquement sous évaluée par rapport à l'anisotropie réelle de l'ensemble des strates. Ce phénomène est dû à l'image

lissée de la conductivité hydraulique que fournissent les essais. L'approche par krigeage peut sembler intéressante car elle donne une anisotropie plus près de la réalité. Elle est par contre sensible aux valeurs extrêmes et ne peut, pour cette raison, être recommandée. L'approche qui semble la plus satisfaisante consiste à simuler des valeurs de conductivité hydrauliques à l'échelle des strates à l'aide d'un modèle de variogramme ponctuel plausible. L'anisotropie du bloc est alors obtenue par le rapport entre les moyennes arithmétiques et harmoniques de l'ensemble des valeurs simulées.

Les deux variogrammes obtenus par les essais numériques ont été utilisés pour simuler des champs de valeurs ponctuelles. La conductivité hydraulique équivalente de chaque champ a été calculée par renormalisation et par différences finies. Les valeurs de conductivité hydraulique équivalente des champs simulés par le variogramme du PERMAC sont moins dispersées que les valeurs de conductivité hydraulique équivalente des champs simulés par le variogramme du bout de tubage. Les champs générés par variogramme du PERMAC ont une plus grande continuité spatiale ce qui explique ces résultats. Des différences dans les résultats ont été obtenus malgré le fait que les deux modèles de variogramme étaient très semblables.

La détermination du variogramme ponctuel est donc nécessaire pour estimer adéquatement l'anisotropie d'un dépôt. Le choix du variogramme ponctuel influence aussi, mais dans une moindre mesure, le résultat du calcul de changement d'échelle.

## RÉFÉRENCES

ABABOU, R., WOOD, E.F. (1990). Comment on "effective groundwater model parameter values: influence of spatial variability of hydraulic conductivities, leakance and recharge" by Gómez-Hernández. Water Resouces Research, 26, 1843-1846.

ALABERT, F. (1987). The practice of fast conditional simulations through the LU decomposition of the covariance matrix. Mathematical Geology, 19, 369-386.

AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., CHAPUIS, R. P. (1996). Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines. Canadian Geotechnical Journal, 33, 470-482.

AUBERTIN, M., CHAPUIS, R. P., BUSSIÈRE, B., AACHIB, M. (1993). Propriétés des résidus miniers utilisés comme matériaux de recouvrement pour limiter le DMA. Geoconfine 93, 1, 299-308.

AUBERTIN, M. (1991). La problématique de la gestion des résidus miniers au Québec. Dans Les mines, le développement durable et l'environnement, APGGQ, 12, 139-152.

BEAR, J. (1972). Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier, New York.

BEAR, J., (1979). Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill, New York.

BERKOWITZ, B., BALBERG, I. (1993). Percolation theory and its application to grounwater hydrology. Water Resouces Research, 29, 775-794.

BOUWER, H., RICE, R.C. (1976). A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. Water Resources Research, 12, 423-428.

BOUWER, H. (1989). The bouwer and rice slug test - an update. Ground Water, 27, 304-309.

BUSSIÈRE, B. (1993). Évaluation des propriétés hydrogéologiques des résidus minier utilisés comme barrière de recouvrement. Thèse M.Sc., École Polytechnique de Montréal.

CAN/BNQ 2501-130-M88 (1988). Soils - Determination of permeability at the end of a casing. National Standard of Canada.

CAN/BNQ 2501-135-M88 (1988). Soils - Determination of permeability by the lefranc method, National Standard of Canada.

CHAPUIS, R. P., L'ÉCUYER, M., AUBERTIN, M. (1993). Field permeability tests in mine tailings. Proceedings of the 46<sup>th</sup> annual Canadian Geotechnical Conference, 51-59.

CHAPUIS, R. P., MONTOUR, I. (1992). Évaluation de l'équation de Kozeny-Carman pour prédire la conductivité hydraulique. Proceedings of 45th Canadian Geotechnical Conference, Toronto, 78.1 - 78.10.

CHAPUIS, R. P., MORIN, R., GILL, D.E. (1992). Développement et évaluation d'un perméamètre autoforeur pour sols silteux. Proceedings of 45th Canadian Geotechnical Conference, Toronto, 77A.1-77A.10.



CHAPUIS, R. P., (1989). Shape factors for permeability tests in boreholes and piezometers. Ground Water, 27, 647-654.

CHRISTAKOS, G., (1984). On the Problem of Permissible Covariance and Variogram Models. Water Resources Reasearch, 20, 251-265.

CHRISTAKOS, G., (1992). Random Fields Models in Earth Sciences, Academic Press, San Diego.

CUSHMAN, J. H. (1986). On measurements scale and scaling. Water Resources Reasearch, 22, 129-134.

DAGAN, G. (1979). Models of groundwater flow in statistically homogeneous porous formations. Water Resources Reasearch, 15, 47-63.

DAGAN, G. (1989). Flow and transport in porous formations. Springer-Verlag, New-York.

DAVIS, M.W. (1986). Production of conditional simulation via the LU triangular decomposition of the covariance matrix. Mathematical Geology, 19, 91-98.

DE MARSILY G. (1981). Groundwater hydrology for engineers. Academic Press.

DESBARATS, A.J. (1987). Numerical estimation of effective permeability in sand-shale formations. Water Resources Reasearch, 23, 273-286.

DESBARATS, A.J. (1992). Spatial averaging of hydraulic conductivity in three-dimensional heterogeneous porous media. Mathematical Geology, 24, 249-266.

DEUTSCH, C. V., JOURNEL, A. J. (1998). GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide (2<sup>nd</sup> edition). Oxford University Press.

EL HADDAD, N. (1993). Simulation par éléments finis d'essais de perméabilité en place. Mémoire de M.Ing., École Polytechnique de Montréal, Canada.

FREEZE, R. A., CHERRY, J. A. (1979). Groundwater. Prentice Hall.

FRIND, E. O. (1993). Groundwater Modeling - Numerical Methods. Notes de lectures pour le cours EARTH 456, Université de Waterloo (non publiées).

GUYONNET, D., MISHRA, S., McCORD, J. (1993). Evaluating the volume of porous medium investigated during slug tests. Ground Water, 31, 627-663.

HEGSTAD, B.K., OMRE, H., TJELMELAND, H., TYLER, K. (1993). Stochastic simulation and conditioning by annealing in reservoir description. Quantitative Geology and Geostatistics, 7, 43-57.

HVORSLEV, M.J. (1951). Time-lag and soil sermeability in groundwater observations. United States Army Engeneering Waterways Experimental Station, Vicksburg , MS, Bulletin 36.

JOURNEL, A.G., HUIJBREGTS, Ch.J. (1978). Mining geostatistics, Academic Press.

JOURNEL, A.G., DEUTSCH, C.V. et DESBARATS, A.J., (1986). Power averaging for block effective permeability. SPE 15128, Society of petroleum engineers.

LANTUÉJOUL, C. (1993). Non conditional simulation of stationary isotropic multigaussian random functions. Quantitative Geology and Geostatistics, 7, 147-177.

LEFRANC, E. (1936). Procédé de mesure de la perméabilité des sols dans les nappes aquifères et application au calcul du débit des puits. Le Génie Civil, 15, 306-308.

LE LOC'H, G. (1987). Étude de la composition des perméabilités par des méthodes variationnelles. Thèse, École Supérieure des Mines de Paris.

L'ÉCUYER, M., CHAPUIS, R. P., AUBERTIN, M. (1992). Propriétés hydro-géotechniques des résidus miniers de Solbec et Cupra, Québec. Proceedings, 45th Canadian Geotechnical Conference, Toronto, 79.1-79.11.

MARCOTTE, D., CHAPUIS, R. P. (1998). Communication personnelle. À paraître.

MATHERON, G. (1967). Éléments pour une théorie des milieux poreux. Masson, Paris.

MATHERON, G. (1971). La théorie des variables régionalisées et ses applications, École nationale des mines, Paris.

MORIN, R. (1992). Amélioration et évaluation d'un perméamètre autoforeur et anti-colmatant. Mémoire de M.Sc.A., École Polytechnique de Montréal, Canada.

PINDER, G.F., FRIND, E.O. (1972). Application of Galerkins procedure to aquifer analysis. Water Resouces Research, 8, 108-120.

REMSON, I., HORNBERGER, G. M., MOLZ, F.J. (1971). Numerical methods in subsurface hydrology. Wiley-Interscience, New York.

RENARD, P. , GALLI, A., GOBLET, P., GRIFFIN, D., LEDOUX, E., LE LOC'H, G., MACKAY, R., (1996). Quick upscaling of flow and transport related parameters. *Commission of the European Communities, Technical Report*.

RENARD, P. (1997). Modélisation des écoulements en milieux poreux hétérogènes: calcul des perméabilités équivalentes. Thèse, École des Mines de Paris.

ROTH, C., CHILÈS, J.P., FOUQUET, C. (1996). Adapting geostatistical transmissivity simulations to finite difference flow simulator. Water Resources research, 32, 3237-3242.

ROVEY, C.W., CHERKAUER, D.C. (1995). Scale dependency of hydraulic conductivity measurements. Ground Water, 33, 769-780.

RUBIN, Y., GÓMEZ-HERNÁNDEZ, J. (1990). A stochastic approach to the problem of upscaling of conductivity in disordered media: theory and unconditional numerical simulations. Water Resources Research, 26, 691-701.

SCHAFMEISTER-SPIERLING, M.-TH., BURGER, H., (1989). Spatial simulation of hydraulic parameters for fluids flow and transport models. Geostatistics, 2, 629-638.

TODD, D. K. (1980). Groundwater Hydrology (second edition). John Wiley and Son.

VICK, S.G. (1983). Planing, desing and analysis of tailing dams. Wiley ed.

## ANNEXE I: MACROS EXCEL D'AUTOMATISATION DE LA GESTION DES FICHIERS

*Effectue un décalage des valeurs de conductivité hydraulique de strates*

```
' Décale les valeurs de CH dans la feuille "valeurs", les données sont
' automatiquement transférées dans la feuille SEP
'
Sub Décale()

'définition des variables
Dim nomfichier As Range
Dim listefichiers As Range
Set listefichiers = Worksheets("valeurs").Range("h5:h2000")
Set nomfichier = Worksheets("valeurs").Range("b5")

Ndecale = InputBox(Prompt:=message1, Title:="DÉCALE")
If Ndecale = "" Then Exit Sub
freq = InputBox(Prompt:=message2, Title:="DÉCALE")
If freq = "" Then Exit Sub
Aleatoire = MsgBox(Prompt:="décalage aléatoire?", Buttons:="260")

i = Rnd(-2) aléatoires
Application.Run Macro:="enregistre"
listefichiers(1) = nomfichier
For i = 1 To ((Ndecale / freq) - 1)
    If Aleatoire = 6 Then
        decalage = Int((2 * freq * Rnd))
    Else
        decalage = freq
    End If
    Sheets("valeurs").Activate
    Worksheets("valeurs").Range("a5").Select
    ActiveCell.Offset(decalage, 0).Range("A1:B2001").Select
    Selection.Copy
    Range("A5").Select
    ActiveSheet.Paste
    Application.Run Macro:="enregistre"
    listefichiers(i + 1) = nomfichier
Next
End Sub
```

### *Enregistre un fichier pour chacun des décalages*

```
' Savegarde les feuilles SEP SE2 sous les noms contenu dans la cellule valeurs.B5
Public Nom As String
Sub Enregistre()
    Dim Nom As Range
    Dim Chemin As Range
    Set Nom = Worksheets("valeurs").Range("B5")
    Set Chemin = Worksheets("valeurs").Range("B2")
    Sheets("SEP").Copy
    ActiveWorkbook.SaveAs Filename:=Chemin & Nom & ".SEP", FileFormat:=xlText
    ActiveWorkbook.Close (SaveChanges = ("false"))
    Windows("SEEP Fichier de paramètres .xls").Activate
    Sheets("valeurs").Select
End Sub
```

### *Change l'ensemble de valeurs simulées*

```
'Msimul: Macro permettant de changer les valeurs des simulations
'Perçois les valeurs dans le fichier: "simulations.xls"
Sub Chsimul()
    Nosimul = InputBox(Prompt:=Message, Title:=Titre)
    If Nosimul = "" Then Exit Sub
    Sheets("valeurs").Select
    Range("d4", Range("d4").End(xlDown)).Select
    Selection.ClearContents
    Workbooks.Open Filename:="C:\Mathieu\maîtrise\excel\Simulation.xls"
    Worksheets("simul").Range("a1").Select
    ActiveCell.Offset(4, Nosimul - 1).Range("A1:A2002").Select
    Selection.Copy
    Windows("SEEP Fichier de paramètres .xls").Activate
    Sheets("valeurs").Range("d4").Select
    ActiveSheet.Paste
    Application.CutCopyMode = False
    Workbooks("Simulation.xls").Close SaveChanges:=False
    Windows("SEEP Fichier de paramètres .xls").Activate
    Application.Run Macro:="Regénère"
End Sub
```

### *Compilation des fichiers de débit*

```

Sub CompilationF00()
    Dim Fichiers As Range
    Dim Chemin As Range
    Dim Numerofichier As Variant
    Dim NomFichier As String
    Dim Section As Variant
    Dim LigneSection As Variant
    Dim Q As Range
    Dim debit As Variant
    Set Fichiers = Worksheets("Compilation").Range("b8", Range("b8").End(xlDown))
    Set Chemin = Worksheets("Compilation").Range("c2")
    Set Q = Worksheets("Compilation").Range("c8:c2000")
    Nbfichiers = Worksheets("Compilation").Range("b8", Range("b8").End(xlDown)).Count

    'choix de la section de flux
    Section = InputBox(Prompt:="Quelle section?", Title:="Section de flux")
    If Section = "" Then Exit Sub
    LigneSection = Section * 2 + 8
    'ouvre chacun des fichiers et copie le débit
    For f = 1 To Nbfichiers
        FichierOuvrir = Chemin & Fichiers(f)
        Workbooks.OpenText Filename:=FichierOuvrir, Origin:= _
            xlWindows, StartRow:=1, DataType:=xlDelimited, TextQualifier _
            :=xlDoubleQuote, ConsecutiveDelimiter:=True, Tab:=True, _
            Semicolon:=False, Comma:=False, Space:=True, Other:=False, _
            FieldInfo:=Array(Array(1, 1), Array(2, 1), Array(3, 1), Array(4, 1), Array _
            (5, 1), Array(6, 1), Array(7, 1))
        Q(f) = ActiveSheet.Range("d" & LigneSection)
        ActiveWorkbook.Close (saveChanges = ("false"))
    Next
End Sub

```



## ANNEXE II: ALGORITHME DE SIMULATION LU

```

function [valsim,L]=simlu(p,mod,n)

%function [valsim] = simlu(p,mod,n)
%
%Produit n simulation géostat sur la grille p d'après le modèle mod
%par la méthode de décomposition LU de la matrice des covariances
%p      : points à simuler
%mod    : Matrice décrivant le variogramme, chaque ligne est une composante [type,c0,c,a]
%n      : nombre de simulations

    randn('seed',sum(100*clock)) %initialise le générateur
    aa=size(p);
    K=mod(2)+mod(3)-modvario(mod,dist2m(p,p));
    L=(chol(K))';
    Y=randn(aa(1),n);
    Z=L*Y;
    valsim=Z;
end

function[gamma]=modvario(modele,d)
%Retourne les valeurs de variogrammes d'après le modèle, pour
%les distances spécifiées dans le vecteur d
%modele: [Co,mod,c,a]
%mod:      exponentiel =1
%      sphérique   =2
%      gaussien    =3

Nmod=size(modele);
gamma=0;
i=d>0;
for j=1:Nmod(1,1);
    c0=modele(j,1);
    mod=modele(j,2);
    c=modele(j,3);
    a=modele(j,4);
    %---modèle exponentiel-----
    if mod==1;
        gamma=i.*(c0+c.*(1-exp(-3*d./a)));
    %---modèle sphérique-----
    elseif mod==2;
        gamma=i.*((d<a).*(c0+c*(1.5*(d/a)-0.5*(d/a).^3))+(d>=a)*(c0+c));
    %---modèle gaussien-----
    elseif mod==3;
        gamma=i.*(c0+c.*(1-exp(-3*(d./a).^2)));
    end
gamma=gamma+gamma;
end;

```

```
function [distances]=dist2m(mat1,mat2)

% CALCUL DE LA DISTANCE ENTRE LES POINTS DE DEUX MATRICES
% distances a M lignes x N col
% M est la longueur de mat1
% N est la longueur de mat2
% Une des deux matrices doit ne comporter que des coordonnées

[Np1,dim1]=size(mat1);
[Np2,dim2]=size(mat2);
dx2=0;
dim=min([dim1;dim2]);
for term=1:dim
    dx2=dx2+((mat1(:,term)*ones(1,Np2))-(mat2(:,term)*ones(1,Np1))).^2;
end;
distances=(dx2).^0.5;
```

### ANNEXE III: ALGORITHME DE RENORMALISATION SIMPLIFIÉE

Cette fonction MATLAB réduit la matrice *data* par renormalisation.

```
function [kmoy,kmin,kmax]=renorm(data,nx,ny)

% data doit avoir un nombre multiple de 2
% nx, ny est le nombre maximum de renormalisations désiré

kmin=data;
kmax=data;
for i = 1:max(nx,ny);
    [sy1,sx1]=size(kmin);
    [sy2,sx2]=size(kmax);
    if sx1 > 1;
        nmat=2./(1./kmin(:,1:sx1-1) + 1./kmin(:,2:sx1));
        id=cos((1:sx1-1)*pi)<0;
        kmin=nmat(:,id);
        end;
    if sy1 > 1
        nmat=0.5*(kmin(1:sy1-1,:)+kmin(2:sy1,:));
        id=cos((1:sy1-1)*pi)<0;
        kmin=nmat(id,:);
        end;
    if sy2 > 1
        nmat=0.5*(kmax(1:sy2-1,:)+kmax(2:sy2,:));
        id=cos((1:sy2-1)*pi)<0;
        kmax=nmat(id,:);
        end;
    if sx2 > 1
        nmat=2./(1./kmax(:,1:sx2-1) + 1./kmax(:,2:sx2));
        id=cos((1:sx2-1)*pi)<0;
        kmax=nmat(:,id);
        end;
end;
kmoy=sqrt(kmin*kmax);
```

# **ANNEXE IV: RÉSULTATS DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ EFFECTUÉS PAR MORIN(1992)**

Tableau A-1 Résultats des essais effectués sur le site de Solbec et Cupra  
(Morin, 1992)

Site 1							
Bout de tubage				PERMAC			
Essai	Profondeur	K	log(K)	Essai	Profondeur	K	log (K)
	(cm)	(cm/s)			(cm)	(cm/s)	
1	110	2.70E-04	-3.57	1	110	8.20E-05	-4.09
2	136	7.50E-05	-4.12	2	135	2.10E-03	-2.68
3	161	6.00E-05	-4.22	3	160	4.30E-04	-3.37
4	185	1.00E-04	-4.00	4	160.1	8.10E-05	-4.09
5	210	7.90E-05	-4.10	5	185	1.80E-04	-3.74
6	234	5.80E-04	-3.24	6	185.1	4.40E-04	-3.36
7	234.1	5.20E-04	-3.28	7	260	1.90E-04	-3.72
8	261	4.00E-05	-4.40	8	335	1.40E-04	-3.85
9	293	2.70E-04	-3.57	9	385	5.10E-05	-4.29
10	311	1.30E-03	-2.89	10	409	1.30E-04	-3.89
11	311.1	3.50E-04	-3.46	11	436	4.30E-05	-4.37
12	336	7.30E-04	-3.14	12	457	6.40E-05	-4.19
13	336.1	7.00E-04	-3.15	13	484	3.20E-05	-4.49
14	361	1.00E-05	-5.00	14	509	1.70E-04	-3.77
15	387	6.70E-05	-4.17	15	534	2.00E-04	-3.70
16	431	1.50E-04	-3.82	16	557	1.70E-04	-3.77
17	431.1	1.40E-04	-3.85	17	557.1	1.30E-04	-3.89
18	456	4.50E-06	-5.35				
19	482	1.60E-05	-4.80				
20	508	5.30E-05	-4.28				
21	533	3.30E-05	-4.48				
22	559	9.40E-05	-4.03				
23	584	2.50E-05	-4.60				
24	609	3.70E-05	-4.43				
moyenne		1.00E-04	-4.00			1.45E-04	-3.84
écart type			0.63				0.43
Site 2							
Bout de tubage				PERMAC			
Essai	Profondeur	K		Essai	Profondeur	K	log (K)
	(cm)	(cm/s)			(cm)	(cm/s)	
1	146	5.40E-05	-4.27	1	150	8.60E-05	-4.07
2	175	1.70E-05	-4.77	2	175	1.30E-04	-3.89
3	200	4.90E-06	-5.31	3	200	4.30E-05	-4.37
4	224	4.30E-05	-4.37	4	225	2.10E-05	-4.68
5	248	7.30E-06	-5.14	5	250	3.10E-05	-4.51
6	276	3.40E-06	-5.47	6	275	1.90E-05	-4.72
7	300	3.00E-05	-4.52	7	300	1.60E-04	-3.80
8	325	1.80E-04	-3.74	8	326	2.60E-05	-4.59
9	375	2.60E-04	-3.59	9	350	4.00E-05	-4.40
10	375.1	3.10E-04	-3.51				
11	400	2.60E-04	-3.59				
12	425	1.00E-05	-5.00				
moyenne		3.64E-05	-4.44			4.64E-05	-4.33
écart type			0.71				0.34
moy glob		7.1634E-05	-4.14				-4.01
eqt glob			0.68				0.46
N			36				26

# ANNEXE V: EXEMPLE DE FICHIER DE PARAMÈTRES SEEP

FILEINFO  
SEEPW 3.04  
TITLE  
C:\seep\BH1  
97-01-29

## ANALYSIS

1 2 9.81E+00 1

## CONVERGE

10 1.00E+00 1.00E+00 1.10E+00 1.00E-04

TIME 0 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0 1 1

## MATERIAL 200

1 1 1 1.00E+00 0.00E+00

2 2 1 1.00E+00 0.00E+00

3 3 1 1.00E+00 0.00E+00

...

## KFUNCTION 200

1 2 0.00E+00 1.50E+00 13 -1.00E+02 2.00E+01 0

Rejets 1.00E-06

0.00E+00 1.00E-06

1.00E+01 1.00E-06

2 2 0.00E+00 1.50E+00 13 -1.00E+02 2.00E+01 0

Rejets 1.00E-06

0.00E+00 1.00E-06

1.00E+01 1.00E-06

...

## SFUNCTION 0

## BFUNCTION 0

## MFUNCTION 0

## NODE 3047

1 +0.0000e+000 -1.0000e+000 +0.0000e+000 +0.0000e+000 +0.0000e+000 200000

2 +1.2500e-002 -1.0000e+000 +0.0000e+000 +0.0000e+000 +0.0000e+000 200000

3 +2.5000e-002 -1.0000e+000 +0.0000e+000 +0.0000e+000 +0.0000e+000 200000

4 +4.0000e-002 -1.0000e+000 +0.0000e+000 +0.0000e+000 +0.0000e+000 200000

5 +6.0000e-002 -1.0000e+000 +0.0000e+000 +0.0000e+000 +0.0000e+000 200000

...

## ELEMENT 2846

1 18 17 1 2 0 0 0 0 200 4 +1.0000e+000 0 0

2 19 18 2 3 0 0 0 0 200 4 +1.0000e+000 0 0

3 20 19 3 4 0 0 0 0 200 4 +1.0000e+000 0 0

4 21 20 4 5 0 0 0 0 200 4 +1.0000e+000 0 0

5 22 21 5 6 0 0 0 0 200 4 +1.0000e+000 0 0

...

## POLE 0

## FLUX 4 1

1 3

1 -1.4841e-002 -1.3626e-001 +1.8374e-001 -1.3548e-001

1 +1.8374e-001 -1.3548e-001 +1.8258e-001 +1.5561e-001

1 +1.8258e-001 +1.5561e-001 -7.8730e-003 +1.5445e-001

## ANNEXE VI: EXEMPLE DE FICHIER DE PARAMÈTRES POUR SGSIM

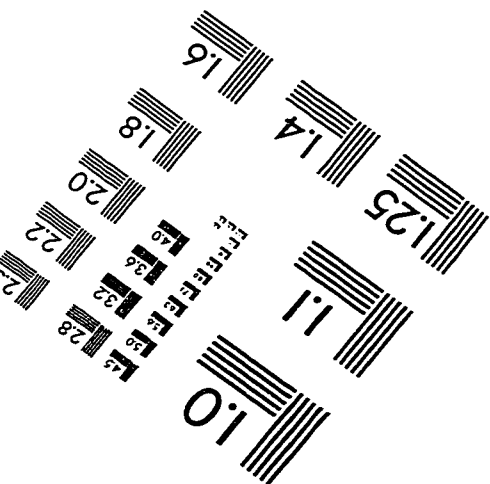
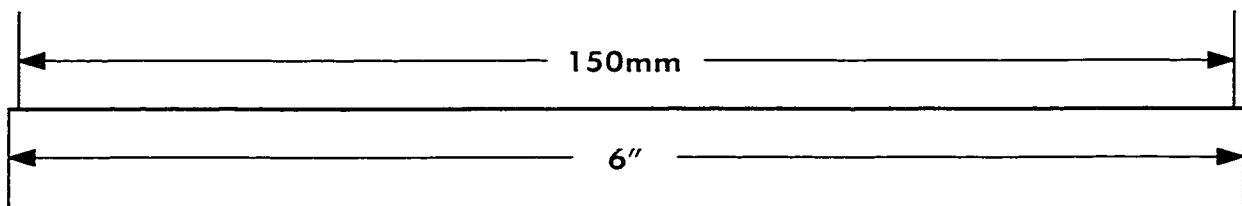
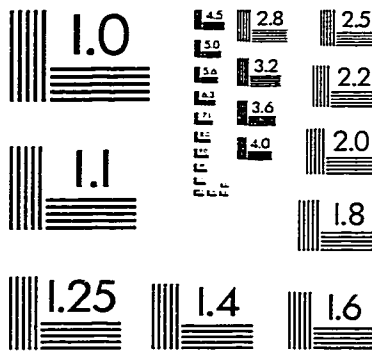
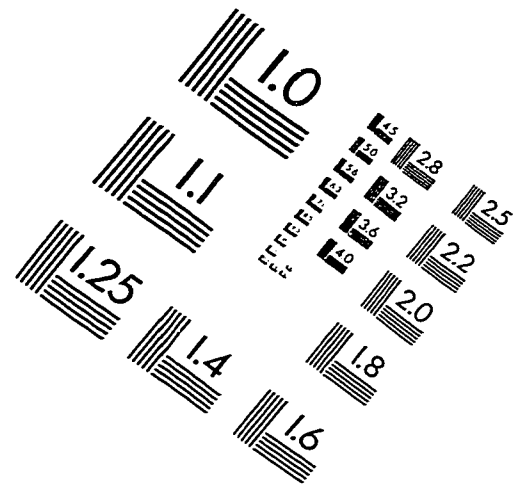
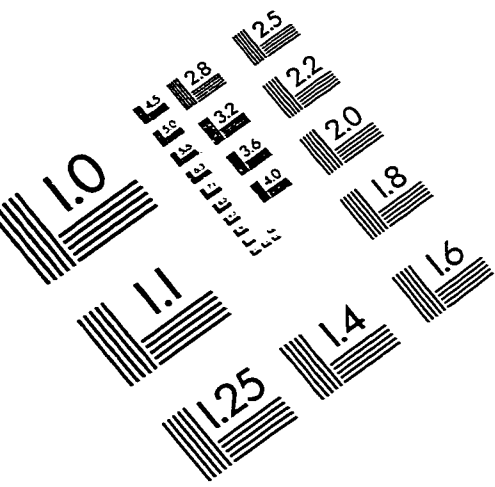
### Parameters for SGSIM

\*\*\*\*\*

#### START OF PARAMETERS:

	\file with data
0 0 0 0 0 0	\columns for X,Y,Z,vr,wt,sec.var.
-1.0e21 1.0e21	\trimming limits
0	\transform the data (0=no, 1=yes)
sgsim.tm	\file for output trans table
0	\consider ref. dist (0=no, 1=yes)
histsmth.out	\file with ref. dist distribution
1 2	\columns for vr and wt
-15.0 15.0	\zmin,zmax(tail extrapolation)
1 0.0	\lower tail option, parameter
1 15.0	\upper tail option, parameter
0	\debugging level: 0,1,2,3
sgsim.dbg	\file for debugging output
c:/toto/strat64.out	\file for simulation output
30	\number of realizations to generate
64 0.125 0.25	\nx,xmn,xsiz
64 0.125 0.25	\ny,ymn,ysiz
1 0.5 0.1	\nz,zmn,zsiz
79069	\random number seed
0 8	\min and max original data for sim
16	\number of simulated nodes to use
1	\assign data to nodes (0=no, 1=yes)
0 3	\multiple grid search (0=no, 1=yes),num
0	\maximum data per octant (0=not used)
16.0 16.0 16.0	\maximum search radii (hmax,hmin,vert)
0.0 0.0 0.0	\angles for search ellipsoid
0 0.60 1.0	\ktype: 0=SK,1=OK,2=LVM,3=EXDR,4=COLC
	\file with LVM, EXDR, or COLC variable
0	\column for secondary variable
1 0.3	\nst, nugget effect
2 0.3 0.0 0.0 0.0	\it,cc,ang1,ang2,ang3
1.6 1.6 1.6	\a_hmax, a_hmin, a_vert

# IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc  
1653 East Main Street  
Rochester, NY 14609 USA  
Phone: 716/482-0300  
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved

